

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

Σχολή Γεωπονικών Επιστημών
Τμήμα Γεωπονίας

**Εκπομπή Πολυκυκλικών Αρωματικών
Υδρογονθράκων από την ανοιχτή καύση αγροτικών
υπολειμμάτων**

ΣΥΡΟΠΟΥΛΟΥ ΖΗΝΟΒΙΑ ΣΩΤΗΡΙΑ

A.M.: FG31186

Φλώρινα, 2024



ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ – ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΦΛΩΡΙΝΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΕΜΠΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ

ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ

**ΕΚΠΟΜΠΗ ΠΟΛΥΚΥΚΛΙΚΩΝ ΑΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ
ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΟΙΧΤΗ ΚΑΥΣΗ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ**

**POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBON EMISSION BY OPEN
BURNING OF AGRICULTURAL DEBRIS**

ΣΥΡΟΠΟΥΛΟΥ ΖΗΝΟΒΙΑ ΣΩΤΗΡΙΑ

Επιβλέπων καθηγητής: Μπέσης Αθανάσιος

Φλώρινα, 2024

Δήλωση μη λογοκλοπής

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι εξ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

Ονοματεπώνυμο

Υπογραφή

Περιεχόμενα

Δήλωση μη λογοκλοπής	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	6
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1. Ατμοσφαιρική ρύπανση και σωματίδια	8
1.1 Ατμοσφαιρική ρύπανση	8
1.2 Αιωρούμενα σωματίδια.....	9
1.3 Κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα	11
1.4 Κίνηση και χρόνος παραμονής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα	14
2. Οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες	15
2.1 Ονοματολογία και φυσικοχημικές ιδιότητες.....	16
2.2 Πηγές ΠΑΥ	17
2.3 Περιβαλλοντικός αντίκτυπος από την καύση αγροτικών υπολειμμάτων	18
2.4 Οδοί Έκθεσης	20
2.5 Επιπτώσεις στην υγεία	21
2.6 Μέτρηση και Ανάλυση.....	22
3. Νομοθετικό πλαίσιο.....	24
3.1 Ευρωπαϊκή νομοθεσία.....	24
3.2 Ελληνική νομοθεσία	25
4. Καύση γεωργικών υπολειμμάτων	26
4.1 Εναλλακτική διαχείριση γεωργικών υπολειμμάτων	28
5. Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας.....	31
5.1 Ανάλυση των δεδομένων, αποτελέσματα και συζήτηση	31
5.2 Προφίλ των PAHs.....	37
5.3 Εκτίμηση Έκθεσης και Κινδύνου για την Υγεία	37
5.3.1 Εκτίμηση μη καρκινογόνου κινδύνου.....	39
5.3.2 Εκτίμηση καρκινογόνου κινδύνου	40
5.3.3 Μη καρκινικός κίνδυνος	41
5.3.4 Κίνδυνος καρκίνου	41
6. Συμπεράσματα	42
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	43

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1: Ονομασία και ιδιότητες ορισμένων PAHs	17
Πίνακας 2: Τα χαρακτηριστικά των δημοσιεύσεων που αναφέρουν τις συγκεντρώσεις ΠΑΥς από την καύση γεωργικών υπολειμμάτων.....	33
Πίνακας 3: Οι Συγκεντρώσεις των ΠΑΥς (ng m^{-3}) από την καύση γεωργικών υπολειμμάτων	34
Πίνακας 4: Στατιστικά στοιχεία για τις συγκεντρώσεις των μελών ΠΑΥς από την καύση γεωργικών υπολειμμάτων (ng m^{-3}).....	35
Πίνακας 5: Τοξικά ισοδύναμα των μελών των ΠΑΥς σε σχέση με το μέλος BaP	39
Πίνακας 6: Οι τιμές δια του στόματος δόσης αναφοράς (RfD) για τα μέλη των ΠΑΥς	40
Πίνακας 7: : Αξιολόγηση μη καρκινικού κινδύνου	41
Πίνακας 8: : Αξιολόγηση καρκινικού κινδύνου.....	41

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1: : Βιογενείς και ανθρωπογενείς εκπομπές σωματιδίων και ΠΑΥ	9
Εικόνα 2: Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης που δείχνει ότι τα ατμοσφαιρικά σωματίδια ποικίλουν σε σχήμα και μέγεθος και είναι κατά πλειοψηφία $<1\mu\text{m}$ και έως $10\mu\text{m}$	10
Εικόνα 3: Σχηματική απεικόνιση της κατανομής μεγέθους των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων (Whitby and Sverdrup, 1980; Salonon et al., 2008).....	13
Εικόνα 4: Σύγκριση του μεγέθους των PM με τη διάμετρο του κόκκου της άμμου και της τρίχας ανθρώπου.....	13
Εικόνα 5: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας παραγωγής, ανάπτυξης και απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων.....	15

Ευρετήριο διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Οι Συγκεντρώσεις των ΠΑΥς (ng m^{-3}) από την καύση γεωργικών υπολειμμάτων ανα καλλιέργεια	36
Διάγραμμα 2: Προφίλ των PAHs στα δείγματα αέρα.....	37

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες (ΠΑΥς) είναι μια ομάδα οργανικών ενώσεων που σχηματίζονται κυρίως κατά την ατελή καύση οργανικών υλικών, όπως τα γεωργικά υπολείμματα. Κατά την καύση γεωργικών αποβλήτων, όπως είναι τα υπολείμματα καλλιεργειών, οι ΠΑΥς εκλύονται στην ατμόσφαιρα και μπορούν να αποτελέσουν σημαντικό παράγοντα ρύπανσης. Η καύση ξύλου, άχρου, φύλλων και άλλων γεωργικών υπολειμμάτων παράγει ΠΑΥς, που μπορεί να περιλαμβάνουν ενώσεις όπως το βενζο[α]πυρένιο (BaP) και το ανθρακένιο. Οι εκπομπές ΠΑΥς αυξάνονται σε συνθήκες ατελούς καύσης, όπου η θερμοκρασία είναι χαμηλή ή το οξυγόνο ανεπαρκές. Οι ΠΑΥς έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα και τη δημόσια υγεία. Είναι γνωστά για τις καρκινογόνες ιδιότητές τους και μπορεί να συμβάλουν σε αναπνευστικά και καρδιαγγειακά προβλήματα. Οι ΠΑΥς μπορούν να συσσωρευτούν στο έδαφος και στο νερό, επηρεάζοντας επίσης τα οικοσυστήματα. Οι συγκεντρώσεις PAHs που εκπέμπονται από την καύση γεωργικών υπολειμμάτων μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο του υπολείμματος, τις συνθήκες καύσης και τα μέτρα ελέγχου της ρύπανσης. Η μείωση των εκπομπών PAHs μπορεί να επιτευχθεί μέσω της εφαρμογής εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης γεωργικών υπολειμμάτων, όπως η κομποστοποίηση. Η διαχείριση και η μείωση των εκπομπών PAHs από γεωργικές πηγές είναι κρίσιμη για την προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος. Στόχος της εργασίας είναι η βιβλιογραφική ανασκόπηση των επιπέδων των ΠΑΥς από ανοικτή καύση γεωργικών υπολειμμάτων και η μελέτη του προφίλ των ΠΑΥς που παράγονται από αυτή τη διαδικασία. Επίσης, η μελέτη του καρκινικού και μη καρκινικού κινδύνου από την ανθρώπινη έκθεση σε αυτές τις χημικές ενώσεις.

ABSTRACT

Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) are a group of organic compounds primarily formed during the incomplete combustion of organic materials, such as agricultural residues. When agricultural waste, such as crop residues, is burned, PAHs are released into the atmosphere and can become a significant pollution factor. The combustion of wood, straw, leaves, and other agricultural residues produces PAHs, which may include compounds such as benzo[a]pyrene (BaP) and anthracene. PAH emissions increase under incomplete combustion conditions, where temperature is low or oxygen is insufficient. PAHs have significant impacts on air quality and public health. They are known for their carcinogenic properties and can contribute to respiratory and cardiovascular problems. PAHs can also accumulate in soil and water, affecting ecosystems. The concentrations of PAHs emitted from the combustion of agricultural residues can vary depending on the type of residue, combustion conditions, and pollution control measures. Reducing PAH emissions can be achieved through the implementation of alternative agricultural residue management methods, such as composting. The management and reduction of PAH emissions from agricultural sources are crucial for protecting public health and the environment. The aim of this work is to review the literature on PAH levels from open burning of agricultural residues and study the PAH profile produced by this process. Additionally, the study focuses on the carcinogenic and non-carcinogenic risks from human exposure to these chemical compounds.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το περιβάλλον, καθώς και η ανθρώπινη υγεία, συχνά επηρεάζεται αρνητικά από αστικές, βιομηχανικές, γεωργικές, κοινωνικές ή διάφορες άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες. Τα τελευταία 60 χρόνια, οι χημικές και αγροδιατροφικές βιομηχανίες παρουσιάζουν μια ανεξέλεγκτη αύξηση της παραγωγής, της εμπορίας, του χειρισμού, της χρήσης και της διάθεσης των χημικών προϊόντων με πολλές και σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία (UNEP, 2009).

Η ζωή του σύγχρονου ανθρώπου έχει αλλάξει σημαντικά, με αποτέλεσμα ο άνθρωπος να είναι σε θέση να γνωρίζει σε μεγάλο ποσοστό και σε βάθος στοιχεία του περιβάλλοντος στο οποίο ζει. Η κοινωνία έρχεται αντιμέτωπη με καινούργια στοιχεία που έχουν σκοπό την αποφυγή λαθών του παρελθόντος και την παράδοση ενός καλύτερου περιβάλλοντος και ενός βέβαιου μέλλοντος στις επόμενες γενιές, στους συνεχιστές του ανθρώπινου γένους.

Η παρούσα εργασία εξετάζει τη ρύπανση της ατμόσφαιρας μέσω της εκπομπής πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (Polycyclic aromatic hydrocarbons - PAHs) λόγω της ανοικτής καύσης αγροτικών υπολειμμάτων. Εντρυφώντας στο θέμα ανακαλύπτουμε πόσο σημαντική είναι η προστασία του περιβάλλοντος και πόσο ευάλωτη μπορεί να είναι η ανθρώπινη φύση απέναντι στις ενέργειες που προκαλούν την υποβάθμιση της ποιότητας του περιβάλλοντος. Οι επιπτώσεις των πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (ΠΑΥ) στην ανθρώπινη υγεία όπως ο κίνδυνος καρκινογένεσης στον άνθρωπο, εξαρτώνται κυρίως από τη διάρκεια και τον τρόπο έκθεσης, τη συγκέντρωση και τη σχετική τοξικότητα των ΠΑΥ.

1. Ατμοσφαιρική ρύπανση και σωματίδια

1.1 Ατμοσφαιρική ρύπανση

Η ατμοσφαιρική ρύπανση, εννοείται εκείνη η κατάσταση της ατμόσφαιρας στην οποία υπάρχουν ουσίες σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις, ώστε να προκαλούν αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στον άνθρωπο. Η ρύπανση της ατμόσφαιρας μεγιστοποιήθηκε στο δεύτερο ήμισυ του περασμένου αιώνα και παρουσιάζει συνεχώς αυξητική τάση. Με τον όρο ουσίες, εννοούμε κάθε χημικό στοιχείο ή ένωση, φυσικής ή ανθρωπογενούς προέλευσης που υπάρχει στην ατμόσφαιρα ως αέριο, υγρό ή σωματίδιο. Όταν τα επίπεδα αυτών των ουσιών είναι πάρα πολύ υψηλά τότε έχουμε “επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης”.

Υπάρχει η ανάγκη για την παρακολούθηση της ποιότητας της ατμόσφαιρας και των επιπέδων κάποιων βασικών ρύπων (πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs), πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), και σωματίδια με διάμετρο κάτω από 10μm (PM₁₀) και 2.5 μm (PM_{2.5})) λόγω των αρνητικών επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία (Jakovljević et al., 2020).

Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

- ✓ Πρωτογενείς ρύποι: αυτοί που εκπέμπονται απ' ευθείας από τις πηγές (π.χ. NO, CO, SO₂).
- ✓ Δευτερογενείς ρύποι: αυτοί που δημιουργούνται στην ατμόσφαιρα μέσω χημικών δράσεων των πρωτογενών ρύπων και των φυσικών συστατικών της ατμόσφαιρας (π.χ. O₃) (Kampa & Castanas, 2008).

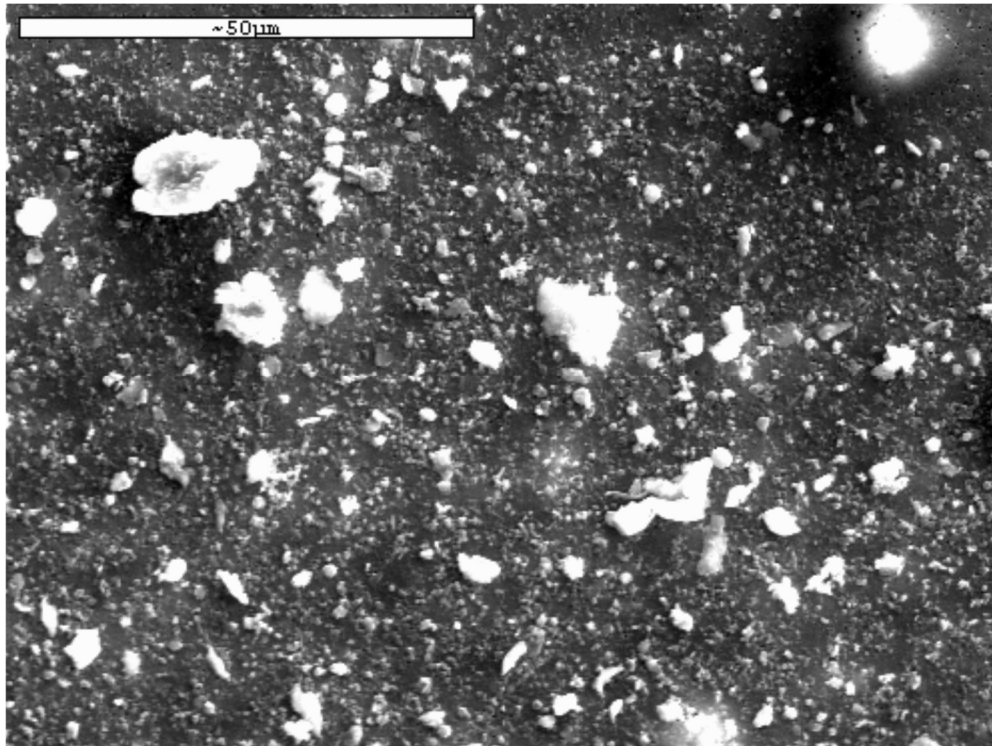
Μια ακόμα σημαντική επίπτωση της αέριας ρύπανσης είναι η μείωση της ορατότητας, λόγω σκέδασης και απορρόφησης του φωτός με αρνητικά αποτελέσματα στο μικροκλίμα της περιοχής. Τα αιωρούμενα σωματίδια επιδρούν και έμμεσα στο κλίμα μέσω των συνεπειών τους στα σύννεφα, ενεργώντας ως πυρήνες συμπύκνωσης σύννεφων. Εκτός αυτού, τα σωματίδια έχουν σημαντικές επιδράσεις και στην υγεία (Satheesh and Krishna, 2005).



Εικόνα 1: : Βιογενείς και ανθρωπογενείς εκπομπές σωματιδίων και ΠΑΥ

1.2 Αιωρούμενα σωματίδια

Η αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη, (particulate matter, PM) ή αλλιώς αιωρούμενα σωματίδια, περιγράφεται ως τα διεσπαρμένα στην ατμόσφαιρα, στερεά ή υγρά σωματίδια, με μέγεθος μεγαλύτερο από αυτό των απλών μορίων (περίπου $2 \cdot 10^{-4}$ μm σε διάμετρο). Τα αιωρούμενα σωματίδια (Εικόνα 2) έχουν διαφορετικά χημικά, φυσικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά ανάλογα με το είδος τους και την πηγή τους. Οι πηγές τους μπορεί να είναι φυσικές ή ανθρωπογενείς και εκπέμπονται απ' ευθείας στην ατμόσφαιρα (πρωτογενή σωματίδια) ή μετασχηματίζονται στην ατμόσφαιρα (δευτερογενή σωματίδια) (Seinfeld & Pandis, 2006).



Εικόνα 2: Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης που δείχνει ότι τα ατμοσφαιρικά σωματίδια ποικίλουν σε σχήμα και μέγεθος και είναι κατά πλειοψηφία $< 1\mu\text{m}$ και έως $10\mu\text{m}$.

Παρακάτω περιγράφονται περιληπτικά οι κυριότερες μορφές με τις οποίες εμφανίζονται τα ατμοσφαιρικά σωματίδια (Shao et al., 2022).

- Κόνις (dust): Στερεό σωματίδιο (έως και $200\mu\text{m}$) που σχηματίζεται μέσω μηχανικού κατακερματισμού στερεών υλικών (π.χ. σκόνη εδάφους).
- Κάπνα (fume): Στερεά δευτερογενή σωματίδια που παράγονται κατά τη συμπύκνωση ατμών ή προϊόντων καύσης αερίων (μέγεθος της τάξης nm).
- Καπνός (smoke): Ορατά αεροζόλ παραγόμενα κατά την ατελή καύση ουσιών που περιέχουν άνθρακα.
- Ομίχλη (fog): Ορατά σταγονίδια σε διασπορά στην ατμόσφαιρα.
- Αχλύς (mist): Σταγονίδια αιωρούμενα στην ατμόσφαιρα που σχηματίζονται από μηχανικές δράσεις ή συμπύκνωση αερίων.
- Ιπτάμενη Τέφρα (fly ash): Λεπτόκοκκα σωματίδια τέφρας στερεών καυσίμων που παρασύρονται με τα καυσαέρια.
- Αιθαλομίχλη (smog): Σταγονίδια και στερεά σωματίδια σε διασπορά στην ατμόσφαιρα που μαζί συνιστούν το λεγόμενο “νέφος”.

1.3 Κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα

Τα σωματίδια της ατμόσφαιρας, γνωστά και ως αεροζόλ, είναι μικροσκοπικά στερεά ή υγρά σωματίδια που αιωρούνται στον αέρα. Μπορούν να προέρχονται από φυσικές διεργασίες ή ανθρώπινες δραστηριότητες και ποικίλλουν ευρέως σε μέγεθος, σύνθεση και πηγές. Η κατηγοριοποίηση των σωματιδίων της ατμόσφαιρας συνήθως λαμβάνει υπόψη το μέγεθος, την προέλευση και τη χημική τους σύνθεση. Εδώ είναι οι κύριες κατηγορίες:

Κατά μέγεθος

- Ultrafine Particles (UFPs): Σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 0,1 μικρόμετρα (100 νανόμετρα). Αυτά συχνά παράγονται από διαδικασίες καύσης, όπως οι εκπομπές οχημάτων και οι βιομηχανικές δραστηριότητες, και μπορούν επίσης να προκύψουν από τη μετατροπή αερίου σε σωματίδιο στην ατμόσφαιρα.
- Λεπτά σωματίδια (PM_{2.5}): Σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 2,5 μικρόμετρα. Αυτά περιλαμβάνουν μια σειρά εκπομπών από την καύση, δευτερογενή σωματίδια που σχηματίζονται από τη μετατροπή αερίου σε σωματίδιο και φυσικές πηγές όπως ο θαλάσσιος ψεκασμός.
- Χονδρόκοκκα Σωματίδια (PM₁₀): Σωματίδια με διάμετρο μεταξύ 2,5 και 10 μικρομέτρων. Αυτά παράγονται συνήθως από μηχανικές διεργασίες, όπως η διάβρωση του εδάφους, ο θαλάσσιος ψεκασμός και οι βιομηχανικές διεργασίες (McNeill, 2017).

Προέλευση

- Πρωτογενή Σωματίδια: Εκπέμπονται απευθείας στην ατμόσφαιρα από πηγές. Παραδείγματα περιλαμβάνουν τη σκόνη από τους δρόμους, τη στάχτη από τις πυρκαγιές και την αιθάλη από την εξάτμιση των οχημάτων.
- Δευτερεύοντα σωματίδια: Σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα μέσω χημικών αντιδράσεων. Για παράδειγμα, το διοξείδιο του θείου (SO₂) και τα οξείδια του αζώτου (NO₂) μπορούν να αντιδράσουν με υδρατμούς για να σχηματίσουν θειικά και νιτρικά άλατα, αντίστοιχα (Ono et al., 2020).

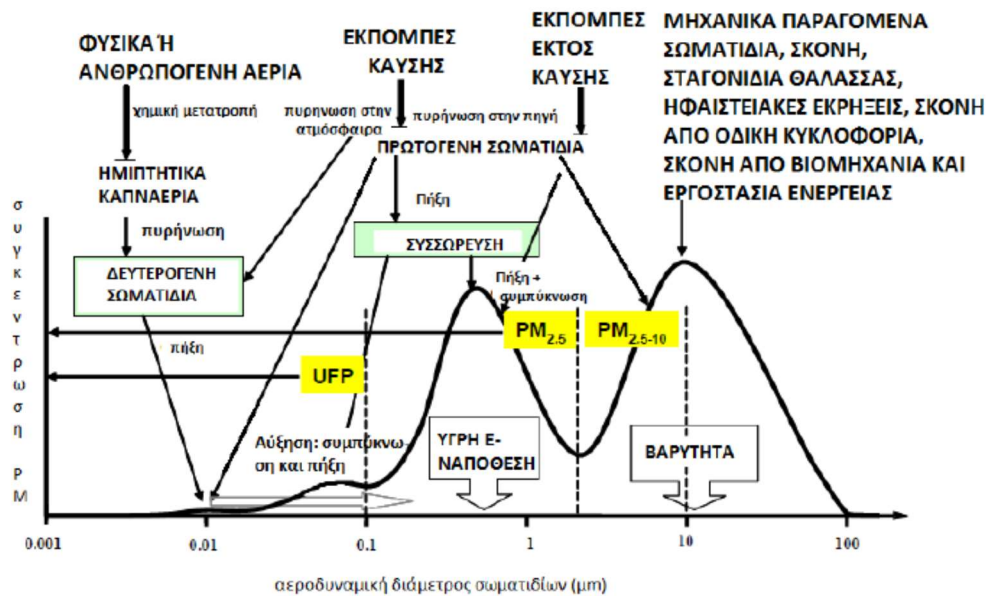
Σύνθεση

- Οργανικά αερολύματα: Αυτά περιλαμβάνουν πρωτογενή οργανικά αερολύματα που εκπέμπονται απευθείας από πηγές όπως καυσαέρια οχημάτων, καύση βιομάζας και δευτερογενή οργανικά αερολύματα (SOA) που σχηματίζονται μέσω της οξείδωσης πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs).

- **Ανόργανα αερολύματα:** Αποτελούνται από μέταλλα, άλατα και άλλες ανόργανες ενώσεις. Κοινά παραδείγματα περιλαμβάνουν θειικά, νιτρικά και αμμώνιο.
- **Μαύρος άνθρακας:** Πρωτεύον σωματίδιο που αποτελείται από καθαρό άνθρακα και αποτελεί σημαντικό συστατικό της αιθάλης. Απορροφά το ηλιακό φως, επηρεάζοντας την ισορροπία της ακτινοβολίας της γης.
- **Ορυκτή σκόνη:** Αποτελούμενη από διάφορα ορυκτά και μέταλλα, αυτά τα σωματίδια παράγονται συνήθως από τη διάβρωση του εδάφους, τις κατασκευαστικές δραστηριότητες και άλλες μηχανικές διεργασίες.
- **Θαλασσινό αλάτι:** Σωματίδια που παράγονται από τον ωκεανό, που αποτελούνται κυρίως από χλωριούχο νάτριο, με άλλα άλατα που υπάρχουν σε μικρότερες ποσότητες (Mu et al., 2021)..

Ειδικές Κατηγορίες

- **Βιοαερολύματα:** Βιολογικά σωματίδια, συμπεριλαμβανομένων βακτηρίων, ιών, γύρης και σπορίων. Αυτά μπορεί να προέρχονται τόσο από φυσικές πηγές όσο και από ανθρώπινες δραστηριότητες.
- **Ηλικιωμένα σωματίδια:** Τα σωματίδια της ατμόσφαιρας που έχουν υποστεί χημικό μετασχηματισμό λόγω αλληλεπιδράσεων με άλλους ρύπους, την ηλιακή ακτινοβολία και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Συχνά παρουσιάζουν διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες σε σύγκριση με την αρχική τους κατάσταση.
- **Κάθε κατηγορία ατμοσφαιρικών σωματιδίων έχει ξεχωριστά χαρακτηριστικά και επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην υγεία.** Για παράδειγμα, τα λεπτά σωματίδια (PM_{2.5}) μπορούν να διεισδύσουν βαθιά στους πνεύμονες και να εισέλθουν στην κυκλοφορία του αίματος, θέτοντας σημαντικούς κινδύνους για την υγεία. Ομοίως, ο μαύρος άνθρακας συμβάλλει στην κλιματική αλλαγή απορροφώντας το ηλιακό φως και θερμαίνοντας την ατμόσφαιρα. Η κατανόηση των πηγών, της σύνθεσης και των επιπτώσεων αυτών των σωματιδίων είναι ζωτικής σημασίας για τη διαχείριση της ποιότητας του αέρα και τις πολιτικές δημόσιας υγείας (Whitby et al., 2022)..



Εικόνα 3: Σχηματική απεικόνιση της κατανομής μεγέθους των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων



Εικόνα 4: Σύγκριση του μεγέθους των PM με τη διάμετρο του κόκκου της άμμου και της τρίχας ανθρώπου.

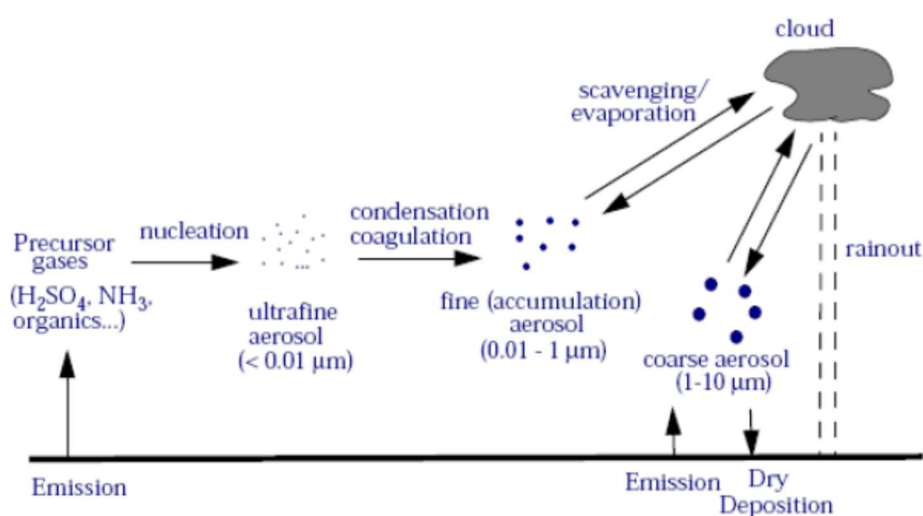
1.4 Κίνηση και χρόνος παραμονής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα

Η κίνηση και ο χρόνος παραμονής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, όπως το μέγεθος των σωματιδίων, οι ατμοσφαιρικές συνθήκες και οι χημικές ιδιότητες. Η κατανόηση αυτών των δυναμικών είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση των επιπτώσεων των αερολυμάτων στο περιβάλλον και στην υγεία. Βασικοί μηχανισμοί μεταφοράς των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα είναι:

- Προσαγωγή: Η οριζόντια κίνηση των μαζών αέρα μεταφέρει σωματίδια σε μεγάλες αποστάσεις. Αυτό μπορεί να συμβεί σε τοπική, περιφερειακή ή ακόμα και παγκόσμια κλίμακα, ανάλογα με τα μοτίβα του ανέμου και τα συστήματα ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας.
- Συναγωγή: Τα κάθετα ρεύματα αέρα μπορούν να ανυψώσουν σωματίδια από την επιφάνεια σε υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Αυτό συχνά συνδέεται με τη θέρμανση στην επιφάνεια της Γης, που οδηγεί στην άνοδο του θερμού αέρα και στην παρασυρμό σωματιδίων.
- Τυρβώδης διάχυση: Ο στροβιλισμός στην ατμόσφαιρα μπορεί να προκαλέσει τυχαία, χαοτική κίνηση σωματιδίων, διασκορπίζοντάς τα σε διάφορες κατευθύνσεις. Αυτή η διαδικασία είναι πιο αποτελεσματική στην ανάμειξη σωματιδίων σε μικρές αποστάσεις.
- Βαρυτική καθίζηση: Τα βαρύτερα σωματίδια τείνουν να καθιζάνουν έξω από την ατμόσφαιρα υπό την επίδραση της βαρύτητας. Αυτή η διαδικασία είναι πιο σημαντική για μεγαλύτερα σωματίδια, όπως τα χοντρά αερολύματα.
- Υγρή εναπόθεση: Τα σωματίδια απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα μέσω της βροχόπτωσης (βροχή, χιόνι, χιονόνερο). Αυτή η διαδικασία είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για την αφαίρεση διαλυτών σωματιδίων και εκείνων που μπορούν να λειτουργήσουν ως πυρήνες συμπύκνωσης νέφους.
- Ξηρή εναπόθεση: Τα σωματίδια κατακάθονται σε επιφάνειες χωρίς καθίζηση. Ο ρυθμός ξηρής εναπόθεσης εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων, τις ιδιότητες της επιφάνειας και τις μετεωρολογικές συνθήκες.

Ο χρόνος παραμονής των σωματιδίων της ατμόσφαιρας αναφέρεται στη μέση διάρκεια που τα σωματίδια παραμένουν αιωρούμενα στην ατμόσφαιρα πριν απομακρυνθούν με εναπόθεση ή χημικό μετασχηματισμό. Αυτός ο χρόνος ποικίλλει ευρέως με βάση τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Τα υπερλεπτά σωματίδια έχουν σχετικά σύντομους χρόνους παραμονής, που συνήθως κυμαίνονται από μερικές ώρες έως λίγες ημέρες, λόγω των διαδικασιών ταχείας πήξης και εναπόθεσης ενώ τα λεπτά σωματίδια (PM_{2.5}) μπορούν να παραμείνουν στην ατμόσφαιρα για αρκετές ημέρες έως εβδομάδες. Είναι αρκετά μικρά ώστε να μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις και μπορούν να παραμείνουν ψηλά για μεγάλες περιόδους, ειδικά στην ανώτερη τροπόσφαιρα. Τέλος, τα χονδρόκοκκα σωματίδια (PM₁₀) έχουν μικρότερους χρόνους παραμονής, που συχνά κυμαίνονται από λίγες ώρες

έως ημέρες, καθώς απομακρύνονται πιο γρήγορα από τη βαρυτική καθίζηση και την ξηρή εναπόθεση. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον χρόνο διαμονής είναι οι μετεωρολογικές συνθήκες (η θερμοκρασία, η υγρασία, τα μοτίβα του ανέμου και η ατμοσφαιρική σταθερότητα μπορούν να επηρεάσουν την κίνηση των σωματιδίων και τον χρόνο παραμονής) όπως και η χημική σύνθεση (Λαζαρίδης, 2010). Η κατανόηση αυτών των παραγόντων είναι κρίσιμη για την πρόβλεψη της ποιότητας του αέρα, την αξιολόγηση των κλιματικών επιπτώσεων και την ανάπτυξη στρατηγικών για τον έλεγχο της ρύπανσης. Ο χρόνος παραμονής των σωματιδίων έχει επίσης σημαντικές επιπτώσεις στη δυνατότητά τους να επηρεάσουν την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον (Lehtinen & Kulmala, 2003).



Εικόνα 5: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας παραγωγής, ανάπτυξης και απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων.

2. Οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες

Ένα μεγάλο κεφάλαιο της οργανικής χημείας αποτελούν οι υδρογονάνθρακες. Οι υδρογονάνθρακες σχετίζονται άμεσα με τα ορυκτά καύσιμα και τα προϊόντα τους ενώ παράγονται και με την καύση τους. Το όνομά τους προκύπτει από τα άτομα που τα αποτελούν, το υδρογόνο και τον άνθρακα ενώ χωρίζονται σε δύο κατηγορίες τους αλειφατικούς και τους αρωματικούς (Azimi et al., 2005).

Οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (ΠΑΥς) είναι πολύ σταθερά μόρια που προκύπτουν από βενζολικούς δακτυλίους μετά από συμπύκνωση. Ανιχνεύονται παντού στη φύση (έδαφος, αέρα, νερό, σκόνη, σωματίδια) και μπορούν να παραμείνουν για μεγάλο χρονικό διάστημα στο περιβάλλον (Besis et al., 2023;2022; Serafeim et al., 2023). Ορισμένοι ΠΑΥς μπορεί να είναι επιβλαβείς στην ανθρώπινη

υγεία και γι αυτό 16 μέλη των ΠΑΥς έχουν χαρακτηριστεί ως ρύποι προτεραιότητας από την Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (USEPA) επειδή μπορεί να προκαλέσουν καρκίνο. Πιο συγκεκριμένα το βενζο[b]φλουορανθέσιο, το βενζο[a]πυρένιο και το βενζο[k]φλουορανθέσιο, βρέθηκε ότι βιοσυσσωρεύονται στο περιβάλλον δεν μπορούν να απομακρυνθούν και γι αυτό χαρακτηρίζονται ως Έμμονοι Οργανικοί Ρύποι (POPs) (Lammel et al., 2020).

2.1 Ονοματολογία και φυσικοχημικές ιδιότητες

Οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες ανήκουν στην κατηγορία των πολυκυκλικών αρωματικών ενώσεων. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει εκτός τους ΠΑΥς, τα νιτρο-, κετο-, υδροξυ-, περοξυ-, οξυγονωμένα και χλωριωμένα παράγωγά τους. Τα παράγωγα των ΠΑΥς θεωρούνται ισχυρότερες μεταλλαξιογόνες ενώσεις σε σχέση με τις μητρικές ενώσεις. Οι ΠΑΥς, αποτελούνται από δύο ή περισσότερους συμπυκνωμένους βενζολικούς δακτυλίους σε γραμμική ή διακλαδισμένη θέση. Ο αριθμός των βενζολικών δακτυλίων οδηγεί και σε διαφορετικά μέλη καθώς και διαφορετικές φυσικοχημικές ιδιότητες (Besis et al., 2022).

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι ονομασίες των 16 μελών των ΠΑΥς καθώς και οι βασικές φυσικοχημικές τους ιδιότητες. Τα μοριακά βάρη των ενώσεων της ομάδας αυτής κυμαίνεται από 166 μέχρι 278 Dalton. Το μοριακό βάρος καθορίζει και την τάση ατμών των ενώσεων αυτών και της τάσης τους να προσκολλώνται σε επιφάνειες σωματιδίων. Τα μέλη με μικρό μοριακό βάρος ανιχνεύονται κυρίως στην αέρια φάση στην ατμόσφαιρα ενώ τα μέλη με υψηλότερο μοριακό βάρος ανιχνεύονται στην σωματιδιακή φάση (Besis et al., 2022). Το μοριακό βάρος των ενώσεων είναι αντιστρόφως ανάλογο με την τάση ατμών και τη διαλυτότητα τους στο νερό. Οι ΠΑΥς είναι πολύ διαλυτοί σε οργανικούς διαλύτες επειδή είναι εξαιρετικά λιπόφιλοι. Επίσης, παρουσιάζουν ευαισθησία στο φως, αντοχή στη θερμότητα, αγωγιμότητα και αντοχή στη διάβρωση.

Οι ΠΑΥς δεν συντίθενται από τον άνθρωπο παρ' όλα αυτά, αρκετά μέλη έχουν εμπορικές χρήσεις.

Οι γενικές χρήσεις ορισμένων PAHs είναι οι εξής:

- Φαινανθρένιο: παρασκευή ρητινών και φυτοφαρμάκων.
- Ακεναφθένιο: παρασκευή χρωστικών ουσιών, πλαστικών, φυτοφαρμάκων και φαρμακευτικών προϊόντων.
- Φλουορανθέσιο: παρασκευή αγροχημικών, χρωστικών και φαρμακευτικών προϊόντων.
- Ανθρακένιο: αραιωτικό για συντηρητικά ξύλου και παρασκευή χρωμάτων.
- Φλουορένιο: παρασκευή φαρμακευτικών προϊόντων, βαφών, φυτοφαρμάκων και θερμοσκληρυνόμενων πλαστικών.
- Πυρένιο: παρασκευή χρωστικών ουσιών (Φυτιάνος και συν. 2009).

Πίνακας 1: Ονομασία και ιδιότητες ορισμένων PAHs

Όνομασία	Συντομογραφία	Μοριακό βάρος	Σημείο Τήξης	Σημείο Βρασμού	LogK _{ow} (torr) 20°C	Διαλυτότητα (μg L ⁻¹)
Φλουορένιο	Fl	166.23	116	295	-2.72	31700
Φαινανθρένιο	Phe	178.2	101	339	-3.5	1290
Ανθρακένιο	An	178.2	216.2	340	-3.53	73
Ακεναφθένιο	Ace	154.21	95	280	-3.92	3900
Πυρένιο	Py	202.3	156	360	-4.73	135
Φλουορανθένιο	Flu	202.3	111	375	-4.54	260
Βενζο[a]ανθρακένιο	BaA	228.3	160	435	-6.02	14
Χρυσένιο	Chr	228.3	255	448	-6.06	2
Βενζο[b]φλουορανθένιο	BbF	252.33	168	481	-5.22	14
Βενζο[k]φλουορανθένιο	BkF	252.33	217	481	-7.13	4.3
Βενζο[a]πυρένιο	BaP	252.33	175	495	-7.33	0.05
Βενζο[e]πυρένιο	BeP	252.31	178.7	493	-7.37	3.8
Ίνδενο[1,2,3-cd]πυρένιο	IP	276.34	163	530	-10	0.5
Βενζο[ghi]περυλένιο	BghiP	276.34	277	525	-9.35	0.3
Διβενζο[a,h]ανθρακένιο	DBA	278.35	267	524	-10	0.5

2.2 Πηγές ΠΑΥ

Οι πηγές των ΠΑΥ μπορούν να διακριθούν ως προς την προέλευσή τους, σε φυσικές και ανθρωπογενείς, με τις ανθρωπογενείς να επικρατούν σε σχέση με τις φυσικές πηγές. Έχουν παρατηρηθεί πολύ υψηλές συγκεντώσεις ΠΑΥς σε αστικές ή βιομηχανικές περιοχές (Φυτιάνος και συν. 2009). Οι ανθρωπογενείς πηγές μπορούν περαιτέρω να διακριθούν σε σταθερές (π.χ. οικιακή θέρμανση και βιομηχανία) και κινητές (π.χ. οχήματα). Στην πρώτη κατηγορία, περιλαμβάνονται καμινάδες οικιακής θέρμανσης ή βιομηχανίας, ανεξέλεγκτες χωματερές, διάφορα κτίρια μέσω του φυσικού ή μηχανικού εξοπλισμού που διαθέτουν κ.α., ενώ στη δεύτερη κατηγορία συγκαταλέγονται κατά κύριο λόγο οι εκπομπές από μεταφορικά μέσα (οχήματα οδικής και μη οδικής κυκλοφορίας) (Χρυσίκου, 2009). Σημαντική είναι και η εκπομπή ΠΑΥς από την καύση αγροτικής βιομάζας που μπορεί να συνεισφέρει κυρίως σε τοπικό επίπεδο. Η καύση της αγροτικής βιομάζας είναι ο πιο κοινός τρόπος απομάκρυνσης των υπολειμμάτων της σοδειάς και της προετοιμασίας των γεωργικών εκτάσεων. Κατά την καύση των οργανικών υλικών της βιομάζας σχηματίζονται μεγάλες ποσότητες ΠΑΥς (Zhang et al., 2011).

Αναλυτικά οι βασικές πηγές ΠΑΥ είναι οι ακόλουθες (Φυτιάνος και συν. 2009; Χατζησπύρου Σ., 2007; Ζωντανού, 2017):

Καύση ορυκτών καυσίμων

Εκπομπές οχημάτων: Τα οχήματα, ειδικά αυτά που κινούνται με κινητήρες ντίζελ, είναι σημαντικές πηγές ΠΑΥς. Η συγκέντρωση των ΠΑΥς στις εκπομπές καυσαερίων μπορεί να ποικίλλει ευρέως ανάλογα με τον τύπο του καυσίμου, την τεχνολογία του κινητήρα και τις συνθήκες λειτουργίας.

Βιομηχανικές διεργασίες

Οι βιομηχανίες που περιλαμβάνουν διεργασίες υψηλής θερμοκρασίας, όπως η διύλιση πετρελαίου, η καύση άνθρακα και η παραγωγή μετάλλων, μπορούν να απελευθερώσουν σημαντικές ποσότητες ΠΑΥς.

Θέρμανση και μαγείρεμα κατοικιών.

Καύση ξύλου και βιομάζας: Η χρήση ξύλου και άλλης βιομάζας για μαγείρεμα και θέρμανση κατοικιών αποτελεί σημαντική πηγή ΠΑΥς, ειδικά σε περιοχές όπου αυτά τα καύσιμα χρησιμοποιούνται συνήθως.

Ψήσιμο στα κάρβουνα: Το μαγείρεμα με κάρβουνα μπορεί επίσης να συμβάλει στις εκπομπές ΠΑΥς.

Φυσικές Πηγές:

Πυρκαγιές: Οι φυσικές διαδικασίες καύσης όπως οι πυρκαγιές απελευθερώνουν ΠΑΥς στην ατμόσφαιρα. Η συγκέντρωση των ΠΑΥς από τις πυρκαγιές μπορεί να ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με το μέγεθος και την ένταση της πυρκαγιάς, τον τύπο της βλάστησης που καίγεται και τις μετεωρολογικές συνθήκες.

Καπνός τσιγάρου

Ο καπνός του τσιγάρου είναι μια γνωστή πηγή ΠΑΥς, που συμβάλλει στη ρύπανση του αέρα σε εσωτερικούς χώρους. Η συγκέντρωση των ΠΑΥς σε περιβάλλοντα με έντονο κάπνισμα μπορεί να είναι αυξημένη, συχνά υπερβαίνοντας τα επίπεδα που βρίσκονται στον εξωτερικό αέρα.

2.3 Περιβαλλοντικός αντίκτυπος από την καύση αγροτικών υπολειμμάτων

Η καύση των αγροτικών υπολειμμάτων εκτός εγκεκριμένου χώρου αποτέφρωσης και συναποτέφρωσης αποτελεί πρόβλημα για τον άνθρωπο και το περιβάλλον καθώς δεν γίνεται ελεγχόμενα και έτσι δεν ανιχνεύονται τα ποσοστά των σωματιδίων που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα (Khalid et al., 2023). Η συνεχόμενη εκπομπή ουσιών που φαίνεται ότι μακροπρόθεσμα επηρεάζουν την υγεία του πληθυσμού φέρουν την επιστημονική κοινότητα στην θέση να προειδοποιεί για τις

συνέπειες και τους αρμόδιους φορείς να λαμβάνουν μέτρα πρόληψης, καταστολής και προστασίας.

Αρχικά, υπόλειμμα των καλλιεργειών θεωρούνται οι ρίζες των φυτών, το φύλλωμα που αποσπάστηκε ακούσια ή εκούσια και έμεινε στο χωράφι, τμήμα των καλλιεργειών που κόβεται κατά το κλάδεμα και οι καρποί που κατά την ανάπτυξή τους και την συγκομιδή έπεσαν ή/και απορρίφθηκαν λόγω μη πλήρωσης των κριτηρίων συλλεκτικής ωριμότητας. Ο διαφορετικός τρόπος αξιοποίησης των υπολειμμάτων απαιτεί χρόνο και κατάρτιση, για αυτό συνηθίζεται η καύση τους, γεγονός που φέρει αρνητικές συνέπειες (ChooChuay et al., 2022)

Η καύση αφορά ένα μεγάλο μέρος των αποβλήτων που παράγονται και μάλιστα σε κάποιες ευρωπαϊκές χώρες αποτελεί πρακτική για όλο τον όγκο απορριμμάτων και όλων των ειδών. Στην Ελλάδα καίγονται κυρίως τα υπολείμματα των καλλιεργειών σιτηρών, καλαμποκιού, κλαδιά καρποφόρων και οπωροφόρων δέντρων, στελέχη ζιζανίων από την καθαριότητα των χωραφιών ακόμη και η βλάστηση που κόβεται πέριξ των επαρχιακών δρόμων. Είναι μία πράξη που διαταράσσει τους βιογεωχημικούς κύκλους γιατί εμποδίζει την φυσιολογική αποικοδόμηση και καταστρέφει τα χημικά στοιχεία των φυτικών υπολειμμάτων. Αν και υπολείμματα, αχρείαστα για την αγορά, έχουν εξίσου, αν όχι και περισσότερα, θρεπτικά συστατικά με το προϊόν που καλλιεργήθηκε και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να θρέψει το χώμα για την επόμενη καλλιέργεια περιορίζοντας έτσι και το πρόβλημα που προκαλεί η υπέρογκη χρήση λιπασμάτων (Αδαμαντιάδου και συνερ. 2014)

Με την καύση, πέρα από την οργανικά συστατικά των υπολειμμάτων, καταστρέφεται και εξωτερική στοιβάδα του εδάφους. Προκαλείται σε βάθος χρόνου ερημοποίηση του εδάφους καθώς η απορροή του νερού αλλοιώνει το έδαφος, κυρίως το επικλινές, με την απώλεια του γόνιμου εδαφικού στρώματος. Καθότι η καύση είναι ατελής, ορισμένες ουσίες, υπολείμματα της καύσης πέραν των ΠΑΥς, εμποδίζουν την εισχώρηση του νερού, του αρδευτικού συστήματος και της βροχής, στο έδαφος κι έτσι παρατηρείται κακή στράγγιση του εδάφους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παρατήρηση ασφυξίας και την ανάπτυξη ασθενειών που προσβάλλουν τόσο το υπέργειο τμήμα όσο και το ριζικό σύστημα των φυτών (Conde et al., 2005).

Στο επίπεδο της ατμόσφαιρας, η καύση οργανικών υπολειμμάτων εντείνει το πρόβλημα του φαινομένου του θερμοκηπίου καθώς δημιουργεί ένα στρώμα αέριων σωματιδίων ορισμένου διαμετρήματος που εμποδίζουν την επιστροφή των ηλιακών ακτινών στο διάστημα, εγκλωβίζοντας την ηλιακή ακτινοβολία εντός της ατμόσφαιρας και έτσι προκαλείται σταδιακά η αύξηση της θερμοκρασίας. Η πυκνότητα του στρώματος αυτού διαφέρει με την εποχή. Η ποσότητα των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα ποικίλει λόγω των καιρικών συνθηκών. Η υγρασία είναι παράγοντας που επιδρά στη δομή των σωματιδίων και η θερμοκρασία επιδρά στον χρόνο αντίδρασης των χημικών ενώσεων που επιφέρουν την δημιουργία ΠΑΥς (Seinfeld & Pandis, 2006) Βέβαια, υπάρχουν κι άλλοι λόγοι που παρατηρείται αυτή η διαφορά στις συγκεντρώσεις των ΠΑΥς. Τους μήνες με χαμηλές θερμοκρασίες εντείνεται η καύση ορυκτών με στόχο την θέρμανση κι έτσι εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα μεγαλύτερη

συγκέντρωση ΠΑΥς. Κατά τους μήνες με υψηλές θερμοκρασίες εκδηλώνονται δασικές πυρκαγιές όπου η μαζική και ξαφνική εκπομπή ΠΑΥς επιδρά έντονα στην ποιότητα της ατμόσφαιρας. Επίσης, η γεωργικές εργασίες που ολοκληρώνονται κατά τους θερινούς μήνες, έχουν ως αποτέλεσμα την καύση υπολειμμάτων με σκοπό την προετοιμασία των κτημάτων για την επόμενη καλλιέργεια. Τα σωματίδια που απελευθερώνονται έχουν επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου, με επιβάρυνση ιδίως του αναπνευστικού συστήματος. (Besis et al., 2022)

2.4 Οδοί Έκθεσης

Οι κύριες οδοί έκθεσης σε ΠΑΥς περιλαμβάνουν:

1. **Εισπνοή:** Η εισπνοή σωματιδίων και ατμοσφαιρικών αερολυμάτων που περιέχουν ΠΑΥς είναι μια από τις κύριες οδούς έκθεσης, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου υπάρχει καύση ξύλου, καυσίμων ή άλλων οργανικών υλικών. Οι εργαζόμενοι σε βιομηχανίες, καθώς και οι κάτοικοι αστικών περιοχών με αυξημένη ρύπανση, είναι πιο επιρρεπείς σε αυτή την οδό έκθεσης. Πρόσφατα μια μελέτη από την Ελλάδα (Besis et al., 2022) παρουσίασε τα αποτελέσματα της βιοπροσβασιμότητας των ΠΑΥς που υπήρχαν σε ατμοσφαιρικά σωματίδια με τη χρήση συνθετικού πνευμονικού υγρού. Η μελέτη αυτή έδειξε ότι τα σωματίδια με διάμετρο $<2,5 \mu\text{m}$ φαίνεται να εισέρχονται ευκολότερα στο αναπνευστικό σύστημα και να μην διασπώνται ή να μην αποβάλλονται με αποτέλεσμα να γίνεται μεγαλύτερη απορρόφηση των ΠΑΥς από τον ανθρώπινο οργανισμό.
2. **Διατροφή:** Οι ΠΑΥς μπορούν να εισέλθουν στον οργανισμό μέσω της κατανάλωσης τροφίμων και νερού που έχουν επιμολυνθεί με τις ενώσεις αυτές. Τα τρόφιμα που μαγειρεύονται σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως το ψήσιμο στη σχάρα ή το κάπνισμα, περιέχουν συχνά υψηλά επίπεδα ΠΑΥς. Η διατροφή είναι η μεγαλύτερη οδό έκθεσης για όλες σχεδόν τις οργανικές ενώσεις. Παλιότερα που δεν υπήρχαν τόσοι τρόποι συντήρησης τροφίμων ένας από αυτούς ήταν το κάπνισμα. Πλέον, η μέθοδος αποσκοπεί και στην βελτίωση της γεύσης. Τα τρόφιμα που καπνίζονται βρίσκονται σε κλειστούς χώρους, σε απευθείας επαφή με καπνό κάποιου ξύλου, παραδείγματος χάριν οξιά, με στόχο να εμπλουτιστεί η γεύση του τελικού προϊόντος. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σε κρέατα, ψάρια και γαλακτοκομικά προϊόντα όπως το τυρί και το κασέρι, αλλά έχει ως αποτέλεσμα τα προϊόντα να φέρουν φορτίο ΠΑΥς, λόγω της εκπομπής καπνού. Η έκθεση τροφίμων σε υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλο χρονικό διάστημα (τηγάνισμα, ψήσιμο στα κάρβουνα) έχει αυτό το αποτέλεσμα, συν την δημιουργία άλλων ενώσεων, όπως το ακρυλαμίδιο, που προκαλούν προβλήματα στον οργανισμό. Είναι εφικτό να βρεθούν συγκεντρώσεις ΠΑΥς σε θαλασσινά και οστρακοειδή όπως τα μύδια, αστακοί κλπ., λόγω μολυσμένων υδάτων από πετρελαιοκηλίδες. Η καθίζηση ΠΑΥς σε φρούτα και λαχανικά, λόγω ύπαρξης στην ατμόσφαιρα, αλλά και στο έδαφος, οδηγεί στην πρόσληψη τους μέσω της διατροφής (Ουρανός Γ.)

3. **Κατάποση:** Η έκθεση σε ΠΑΥς μπορεί να συμβεί από την κατάποση σωματιδίων και σκόνης που περιέχει ΠΑΥς μια όδο έκθεσης που επηρεάζει κυρίως τα παιδιά.
4. **Δερματική απορρόφηση:** Η επαφή με επιφάνειες ρυπασμένες με ΠΑΥς, όπως χώμα, αιθάλη ή λάδια, μπορεί να οδηγήσει σε δερματική απορρόφηση. Αυτός ο τρόπος έκθεσης είναι σχετικός για άτομα που εργάζονται σε περιβάλλοντα με αυξημένη έκθεση, όπως μηχανικοί ή εργάτες κατασκευών.

Η μακροχρόνια έκθεση σε PAHs μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία, όπως αναπνευστικά προβλήματα, καρδιαγγειακά νοσήματα και αυξημένο κίνδυνο καρκίνου. Οι εργαζόμενοι σε βιομηχανικούς τομείς, καθώς και οι κάτοικοι αστικών περιοχών με υψηλή ρύπανση, πρέπει να λαμβάνουν προληπτικά μέτρα για τη μείωση της έκθεσης σε αυτές τις ενώσεις. Οι εργαστηριακές έρευνες που ενοχοποιούν τους ΠΑΥς για τα περισσότερα προβλήματα υγείας του σύγχρονου ανθρώπου υπογραμμίζουν την σημασία της ποσοτικής και ποιοτικής έκθεσης στους παραπάνω ρυπαντές.

2.5 Επιπτώσεις στην υγεία

Οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες είναι μια ομάδα οργανικών ενώσεων που έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην υγεία λόγω των τοξικών, μεταλλαξιογόνων και καρκινογόνων ιδιοτήτων τους. Η έκθεση σε ΠΑΥς μπορεί να συμβεί μέσω εισπνοής, κατάποσης και επαφής με το δέρμα. Οι επιπτώσεις των ΠΑΥς στην υγεία εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των συγκεκριμένων ενώσεων ΠΑΥς, του επιπέδου και της διάρκειας έκθεσης και της οδού έκθεσης. Ορισμένες ομάδες είναι πιο ευάλωτες στις επιπτώσεις των ΠΑΥ στην υγεία, συμπεριλαμβανομένων των παιδιών, των ηλικιωμένων και των ατόμων με προϋπάρχουσες παθήσεις υγείας (Kim et al., 2013). Οι εργαζόμενοι σε βιομηχανίες όπως η εξόρυξη άνθρακα, η παραγωγή ασφάλτου και ορισμένοι μεταποιητικοί κλάδοι μπορεί επίσης να αντιμετωπίσουν υψηλότερα επίπεδα έκθεσης και συνεπώς μεγαλύτερους κινδύνους για την υγεία. Οι ΠΑΥς είναι συνδεδεμένοι με τα λεπτά σωματίδια, που ανήκουν στο αναπνεύσιμο κλάσμα της σωματιδιακής ύλης. Υπάρχει η πιθανότητα επομένως να περάσουν διαμέσου της ρινικής κοιλότητας του αναπνευστικού συστήματος και να εισχωρήσουν βαθύτερα στους αεραγωγούς και τις κυψελίδες. Πιο συγκεκριμένα το εισπνεύσιμο κλάσμα των σωματιδίων αποτελείται από σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 10 μm, ενώ εκείνα που διαπερνούν το ανώτερο τμήμα της αναπνευστικής οδού (ρινοφάρυγγας) ονομάζονται θωρακικά σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 7 μm. Τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 2.5 μm (αναπνεύσιμο κλάσμα), καταφέρνουν να εισχωρήσουν μέχρι τις κυψελίδες του πνεύμονα και για αυτόν ακριβώς τον λόγο αποτελούν και το σημαντικότερο από πλευράς επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία κλάσμα (Besis et al., 2022; Χρυσίκου 2009). Στις κυψελίδες ενδέχεται να υπάρξει αλληλεπίδραση μεταξύ του πνεύμονα και των σωματιδίων, να εκροφηθούν οι ΠΑΥς από τα σωματίδια και να απορροφηθούν από τον πνευμονικό ιστό (Καραθανάσης, 2007).

Αρκετοί ΠΑΥς ταξινομούνται ως καρκινογόνοι. Ο Διεθνής Οργανισμός Έρευνας για τον Καρκίνο (IARC) έχει ταξινομήσει ενώσεις όπως το βενζο[α]πυρένιο, ένας πολύ γνωστός ΠΑΥ, ως καρκινογόνες της Ομάδας 1, που σημαίνει ότι είναι καρκινογόνες για τον άνθρωπο. Η έκθεση σε ΠΑΥς έχει συσχετιστεί με αυξημένο κίνδυνο καρκίνων, ιδιαίτερα του πνεύμονα, του δέρματος, της ουροδόχου κύστης και του ήπατος. Ενδεικτικά αναφέρονται οι παρακάτω ΠΑΥς, ανθρακένιο, χρυσένιο, φθορανθένιο, βενζο(a)ανθρακένιο, βενζο(a)πυρένιο και το πυρένιο, διβενζο(a,h)ανθρακένιο, βενζο(k)φθορανθένιο, διβενζο(a,i)πυρένιο κ.α. και κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογες με την επίδραση στον άνθρωπο. Στην κατηγορία Α εντάσσονται οι καρκινογόνοι για τον άνθρωπο, όπως το βενζο(a)πυρένιο, στην κατηγορία Β οι πιθανόν καρκινογόνοι για τον άνθρωπο, όπως το διβενζο(a,h)ανθρακένιο, κατηγορία Γ οι ενδεχομένως καρκινογόνοι για τον άνθρωπο, όπως το βενζο(a)ανθρακένιο και κατηγορία Δ οι μη καταγεγραμμένοι ως καρκινογόνοι για τον άνθρωπο, όπως το χρυσένιο. (Kim et al., 2013)

Η έκθεση σε ΠΑΥς κατά τη διάρκεια της εγκυμοσύνης έχει συσχετιστεί με ανεπιθύμητες αναπτυξιακές επιπτώσεις στο έμβρυο. Αυτά περιλαμβάνουν χαμηλό βάρος γέννησης, πρόωρο τοκετό και αναπτυξιακές καθυστερήσεις. Οι ΠΑΥς μπορούν επίσης να επηρεάσουν το αναπαραγωγικό σύστημα, δυνητικά, μειώνοντας τη γονιμότητα και επηρεάζοντας την αναπαραγωγική υγεία (Dai et al., 2023). Οι ΠΑΥς μπορούν επίσης να προκαλέσουν γενετική βλάβη, οδηγώντας σε μεταλλάξεις. Αυτή η γονοτοξικότητα οφείλεται κυρίως στο σχηματισμό προϊόντων προσθήκης PAH-DNA, όπου οι μεταβολίτες ΠΑΥς συνδέονται με το DNA. Αυτές οι μεταλλάξεις μπορεί να οδηγήσουν σε καρκίνο και άλλες γενετικές διαταραχές.

Η άμεση επαφή του δέρματος με τους ΠΑΥς, ιδιαίτερα σε επαγγελματικούς χώρους, μπορεί να οδηγήσει σε ερεθισμό του δέρματος και φλεγμονή. Η χρόνια έκθεση μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο καρκίνου του δέρματος, ειδικά σε άτομα που εκτίθενται σε PAH σε αιθάλη, πίσσα ή λάδι (Strandberg et al., 2018).

Για τον μετριασμό των επιπτώσεων των ΠΑΥς στην υγεία, οι ρυθμιστικοί φορείς έχουν θεσπίσει κατευθυντήριες γραμμές και όρια για τις συγκεντρώσεις ΠΑΥς στον αέρα, το νερό και τα τρόφιμα. Τα μέτρα δημόσιας υγείας περιλαμβάνουν τη μείωση των εκπομπών από βιομηχανικές πηγές, την προώθηση εναλλακτικών λύσεων καθαρότερης ενέργειας και την ενθάρρυνση της μείωσης της έκθεσης στον καπνό του τσιγάρου.

2.6 Μέτρηση και Ανάλυση

Η ανάλυση των πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (ΠΑΥς) περιλαμβάνει τον εντοπισμό και τον ποσοτικό προσδιορισμό αυτών των ενώσεων σε περιβαντολλογικά δείγματα, όπως ο αέρας, το νερό, το έδαφος και οι βιολογικοί ιστοί. Η ανάλυση είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής

ρύπανσης, της ανθρώπινης έκθεσης και των πιθανών κινδύνων για την υγεία που συνδέονται με τους ΠΑΥς (Wise et al., 2015).

Συλλογή και προετοιμασία δειγμάτων

Συνολικά, η ανάλυση των ΡΑΗ είναι μια περίπλοκη διαδικασία που απαιτεί προσεκτικό χειρισμό δειγμάτων, προηγμένες αναλυτικές τεχνικές και αυστηρό ποιοτικό έλεγχο για την εξασφάλιση αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Αυτές οι πληροφορίες είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της κατανομής, των πηγών και των επιπτώσεων των ΠΑΥς στο περιβάλλον.

Τα ατμοσφαιρικά δείγματα συλλέγονται συνήθως χρησιμοποιώντας δειγματολήπτες μεγάλου όγκου που αντλούν αέρα μέσω φίλτρων ή απορροφητικών. Τα φίλτρα παγιδεύουν ΠΑΥ που συνδέονται με σωματίδια, ενώ τα απορροφητικά δεσμεύουν τους αέριους ΠΑΥ. Μετά τη συντήρηση των δειγμάτων σε ψυκτικούς θαλάμους ακολουθεί η εκχύλιση. Οι ΠΑΥ εξάγονται από το δείγμα χρησιμοποιώντας διαλύτες, όπως διχλωρομεθάνιο ή εξάνιο. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές όπως η εκχύλιση Soxhlet, η επεξεργασία με υπερήχους ή η εξαγωγή με τη βοήθεια μικροκυμάτων. Τα εκχυλίσματα απαιτούν συχνά καθαρισμό για την απομάκρυνση των παρεμβατικών ουσιών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως η χρωματογραφία στήλης με σιλικάζελ ή αλουμίνα.

Αναλυτικές Τεχνικές

- **Αέρια Χρωματογραφία (GC):** Η GC είναι η πιο κοινή μέθοδος για την ανάλυση ΡΑΗ, συχνά σε συνδυασμό με έναν ανιχνευτή ιονισμού φλόγας (FID) ή ένα φασματόμετρο μάζας (MS). Το GC-MS είναι ιδιαίτερα ισχυρό, προσφέροντας υψηλή ευαισθησία και ικανότητα αναγνώρισης μεμονωμένων ενώσεων ΡΑΗ.
- **Υγρή Χρωματογραφία Υψηλής Απόδοσης (HPLC):** Η HPLC, ειδικά με ανίχνευση φθορισμού (HPLC-FLD), χρησιμοποιείται επίσης ευρέως για ανάλυση ΡΑΗ, ιδιαίτερα για ΡΑΗ υψηλού μοριακού βάρους. Παρέχει καλή ευαισθησία και επιλεκτικότητα για τους ΡΑΗ.

Οι ΠΑΥς προσδιορίζονται με βάση τους χρόνους κατακράτησης (σε GC ή HPLC) και τα φάσματα μάζας. Κάθε ένωση ΡΑΗ έχει ένα χαρακτηριστικό φάσμα μάζας, το οποίο επιτρέπει την ακριβή ταυτοποίηση. Η συγκέντρωση των ΡΑΗ προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας καμπύλες βαθμονόμησης που δημιουργούνται από πρότυπα γνωστών συγκεντρώσεων. Τα αποτελέσματα συχνά εκφράζονται σε νανογραμμάρια ανά κυβικό μέτρο (ng/m^3) για δείγματα αέρα, μικρογραμμάρια ανά λίτρο ($\mu\text{g}/\text{L}$) για νερό ή μικρογραμμάρια ανά χιλιόγραμμο ($\mu\text{g}/\text{kg}$) για δείγματα εδάφους, ιζημάτων και βιολογικών προϊόντων. Η χρήση εσωτερικών προτύπων, προτύπων αντιστοιχισμένων με μήτρες και διαδικαστικών κενών συμβάλλει στη διασφάλιση της ακρίβειας και της ακρίβειας της ανάλυσης.

3 Νομοθετικό πλαίσιο

Η ενεργειακή κρίση και η κλιματική αλλαγή έχουν φέρει τη σύγχρονη κοινωνία αντιμέτωπη με βασικά προβλήματα που πηγάζουν από τη λανθασμένη διαχείριση περιβαλλοντικών ζητημάτων των προηγούμενων ετών. Υπεύθυνοι για τη διαχείριση τέτοιων υποθέσεων και για την επίλυση των προβλημάτων που προκύπτουν είναι θεσμικά όργανα όπως το Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής για την Ελλάδα, ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος για την Ευρωπαϊκή Ένωση και ο Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών. Φορείς όπως ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας, η Ευρωπαϊκή Ένωση, τα Υπουργεία των κρατών και ομάδες χωρών όπως οι G7 και G20 μελετούν, συνεδριάζουν και ορίζουν νόμους με σκοπό να θέσουν στόχους που αποσκοπούν στην αντιμετώπιση κρίσεων.

3.1 Ευρωπαϊκή νομοθεσία

Οι Οδηγίες 2008/98/EK, 2008/99/EK, αναφέρουν λεπτομερώς τους στόχους της ΕΕ για την προστασία του περιβάλλοντος, τους ορισμούς των εννοιών και γίνεται σαφής η απαγόρευση της ακαταλόγιστης καύσης των αποβλήτων. Με λίγες χώρες να καταφέρνουν την τήρηση των Οδηγιών και την συμμόρφωση με τις επιθυμίες του Κοινοβουλίου για την απεξάρτηση της Ευρώπης από τα ορυκτά καύσιμα και την πλήρη στήριξη της στην πράσινη ενέργεια, η ΕΕ δεν παύει να βάζει στόχους για την αποτελεσματική αντιμετώπιση της περιβαλλοντικής υποβάθμισης. Τέλος, για τους ΠΑΥ το B[a]Py θεωρείται δείκτης της καρκινογόνου δραστηριότητας των PAHs και σύμφωνα με την οδηγία 2004/107/EK καθορίστηκε ετήσιο όριο για το B[a]Py που περιέχεται στα εισπνεύσιμα σωματίδια PM10, το οποίο είναι ίσο με 1 ng/m³.

3.2 Ελληνική νομοθεσία

Στην Ελληνική νομοθεσία υπάρχουν κάποιες οδηγίες για την αποτροπή της ρύπανσης γενικότερα, ωστόσο δεν υπάρχει σαφής νομοθεσία για την καύση και την αξιοποίηση των γεωργικών αποβλήτων. Σύμφωνα με την Εφημερίδα της Κυβερνήσεως και το Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ), η ελλιπής νομοθεσία και η μηδενική εποπτεία της αξιοποίησης αποβλήτων οδηγεί στη μη εκμετάλλευση του μεγαλύτερου ποσοστού των απορριμμάτων. Παρατηρούνται φαινόμενα απόρριψης αποβλήτων σε απομακρυσμένα μιν, εντός της κατοικήσιμης περιοχής δε, μέρη και καταστροφή του τμήματος τους με καύση ή ταφή. Για τα μεγάλα αστικά κέντρα αυτά τα μέρη ενδέχεται να είναι τα επίσημα ΧΥΤΑ αλλά, για τις περιοχές της επαρχίας η απόρριψη γίνεται σε απομακρυσμένα σημεία δημιουργώντας παράνομες χωματερές.

Το ελληνικό κράτος θεσπίζοντας τον νόμο και τις υπουργικές αποφάσεις 4042/2012 ΦΕΚ Α- 24/13.02.2012, που αφορά την προστασία του περιβάλλοντος και 1327/1983, που αφορά την αντιμετώπιση εκτάκτων επεισοδίων ρύπανσης του περιβάλλοντος και τη ρύθμιση συναφών θεμάτων, διασφαλίζει την διατήρηση του οικοσυστήματος και αποτρέπει την οικολογική καταστροφή ορίζοντας τις νομικές συνέπειες. Αυτές είναι η καταβολή χρηματικού αντιτίμου και ποινή φυλάκισης για τους παραβάτες, ανάλογα με την παράβαση. Η πιο πρόσφατη προσαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας στην Ελληνική νομοθεσία αποτελεί ο νόμος 4819/2021 που έχει ως κύριο θέμα την κατάργηση μερικών προηγούμενων οδηγιών και την προσαρμογή των υπαρχουσών στα σύγχρονα δεδομένα. Ανήκει στο νέο νομοθετικό πλαίσιο που έχει ως στόχο του την συμπόρευση με την νομοθεσία της ΕΕ και το Σχέδιο Δράσης για την Κυκλική Οικονομία.

Στην υπουργική απόφαση “Αριθμ. Η.Π. 14122/549/Ε.103/2011” που εκδόθηκε στο ΦΕΚ 488/Β’ στις 30 Μαρτίου 2011 με θέμα “τα μέτρα για την βελτίωση της ατμόσφαιρας, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2008/50/ΕΚ <<για την προστασία του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη>> του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης της 21^{ης} Μαΐου 2008” αναφέρονται τα ανώτερα και τα κατώτερα όρια συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων και διαφόρων ρυπογόνων ουσιών. Ο ετήσιος μέσος όρος για το ανώτερο ποσό συγκέντρωσης ΠΑΥς (ΑΣ₁₀ ΑΣ_{2.5}) είναι 28μg/m³ και 17μg/m³ αντίστοιχα. Το ανώτερο όριο συγκέντρωσης βενζολίου στην ατμόσφαιρα ανέρχεται σε 3,5μg/m³, δηλαδή το 70% της οριακής τιμής. Αναφέροντας ωστόσο και τα κατώτερα όρια, η συγκέντρωση ΑΣ₁₀ και ΑΣ_{2.5} είναι το 50% της οριακής τιμής ενώ το κατώτερο όριο συγκέντρωσης βενζολίου το 40%, δηλαδή 2μg/m³.

Τίθενται στόχοι για την απορρύπανση της ατμόσφαιρας με χρονικό περιθώριο το 2025 και το 2030 όπως η μείωση των ποσοστών των απορριμμάτων που απομακρύνονται από τον αστικό ιστό μέσω της μεθόδου της υγειονομικής ταφής, η επεξεργασία των υπολειμμάτων, η προσπάθεια διαχωρισμού των αποβλήτων από τα

πλαστικά υλικά συσκευασίας γεωργικών προϊόντων και υλικών δόμησης θερμοκηπίων και η επεξεργασία των υπολειμμάτων για περαιτέρω αξιοποίηση σε διαφορετικούς τομείς της κοινωνίας. Κάτι τέτοιο όμως για να πραγματοποιηθεί απαιτείται αναδιάρθρωση του νομοθετικού πλαισίου και πλήρη συντονισμό των φορέων και των εκτελεστικών οργάνων. Αποτελεί δέσμευση της εθνικής πολιτικής η ένταξη στην κυκλική οικονομία μέχρι το 2030 για αυτό και προτείνει την αναβάθμιση του τομέα συλλογής αποβλήτων, δημιουργία υποδομών και χώρων συλλογής των αποβλήτων όπου θα γίνεται και διαχωρισμός αποβλήτων σε οργανικά, μη οργανικά, ανακυκλώσιμα υλικά, υλικά συσκευασίας κλπ. Παράλληλα, επισημαίνεται και η σωστή διαχείριση των επικίνδυνων αποβλήτων όπως τα απόβλητα νοσοκομείων και εργαστηρίων, απόβλητα που περιέχουν βαρέα μέταλλα και επιβλαβή χημικά.

Σύμφωνα με την Πολλαπλή Συμμόρφωση στα πλαίσια της Ενιαίας Ενίσχυσης (Αποφ. 262385/ΦΕΚ 509 Β/23-4-2010), απαγορεύεται η καύση των φυτικών υπολειμμάτων (σιτηρά, αραβόσιτος, ηλιάνθος κλπ.) και επιβάλλονται κυρώσεις. Η καύση αγροτικών εκτάσεων επιτρέπεται μόνο μετά από άδεια που εκδίδεται από την αρμόδια Πυροσβεστική Υπηρεσία, λαμβάνοντας υπόψη τον προβλεπόμενο δείκτη επικινδυνότητας και την τήρηση των απαιτούμενων μέτρων που προβλέπονται στην Πυροσβεστική Διάταξη 9Α/2005. Ο δείκτης επικινδυνότητας προσδιορίζεται από τον Χάρτη Πρόβλεψης Κινδύνου Πυρκαγιάς που εκδίδεται καθημερινά κατά τη διάρκεια της αντιπυρικής περιόδου από τη Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας. Επιπρόσθετα, εφόσον οι μέσες εικοσιτετράωρες συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων ξεπεράσουν τα 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, απαγορεύεται η οποιαδήποτε καύση σε ανοικτούς χώρους (ΚΥΑ οικ.70601/ΦΕΚ 3272 Β/23-12-2013).

4. Καύση γεωργικών υπολειμμάτων

Η καύση αγροτικών υπολειμμάτων είναι μια πρακτική που χρησιμοποιείται παγκοσμίως για τη διαχείριση των αποβλήτων από καλλιέργειες, όπως άχυρο, κλαδιά, και άλλα οργανικά υλικά που παραμένουν μετά τη συγκομιδή. Παρά την απλότητα και την άμεση αποτελεσματικότητα αυτής της μεθόδου, έχει σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και τη δημόσια υγεία. Η καύση των γεωργικών φυτικών υπολειμμάτων αποτελεί μία πρακτική η οποία δεν προσφέρει τίποτε το θετικό, αλλά αντιθέτως προκαλεί σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις:

1) Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Ατμοσφαιρική Ρύπανση: Η καύση των αγροτικών υπολειμμάτων απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες αερίων όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του θείου (SO_2), και οξείδια του αζώτου (NO_x). Επιπλέον, παράγονται μικροσωματίδια (PM), τα οποία μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή ατμοσφαιρική ρύπανση. Σημαντικό επίσης είναι το γεγονός ότι

κατά την καύση απελευθερώνονται πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), οι οποίοι είναι καρκινογόνοι και επιβλαβείς για την ανθρώπινη υγεία.

Επίδραση στο Κλίμα: Η απελευθέρωση αερίων του θερμοκηπίου, όπως το CO₂ και το μεθάνιο (CH₄), συμβάλλει στην αλλαγή του κλίματος. Η καύση βιομάζας είναι υπεύθυνη για ένα σημαντικό ποσοστό των παγκόσμιων εκπομπών αυτών των αερίων.

II) Επιπτώσεις στη γεωργική παραγωγή

- **Αλλοίωση του Εδάφους:** Η καύση αφαιρεί θρεπτικά στοιχεία από το έδαφος, όπως άζωτο και οργανική ύλη, που θα μπορούσαν να επανέλθουν στο έδαφος μέσω της αποσύνθεσης. Αυτό μπορεί να μειώσει τη γονιμότητα του εδάφους μακροπρόθεσμα.
- **Μείωση της διήθησης του νερού της βροχής και της άρδευσης στο έδαφος.** Διάφορες λιπώδεις ουσίες των υπολειμμάτων προσκολλώνται μετά την καύση αυτών στα εδαφικά σωματίδια που τα καθιστούν υδρόφοβα. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει κακή στράγγιση του χωραφιού.
- **Εμφάνιση ασφυκτικών φαινομένων στα φυτά εξαιτίας της κακής στράγγισης.** Συνέπεια των ασφυκτικών φαινομένων αυτών είναι η αύξηση σε σημαντικό βαθμό των μυκητολογικών ασθενειών τόσο του ριζικού συστήματος, όσο και του υπέργειου μέρους των φυτών, με καταστροφή της οργανικής ουσίας, κακή στράγγιση, ασθένειες της ρίζας και εν τέλει κακή θρέψη των φυτών.
- **Μη καταπολέμηση των εντόμων που διαχειμάζουν μέσα στην καλαμιά (πυραλίδα, σεζάμια).** Η καύση δεν καταπολεμάει ούτε τα έντομα εκείνα που διαχειμάζουν εντός του εδάφους (πράσινο σκουλήκι, διαβρώτικα κλπ.), επειδή το βάθος στο οποίο φθάνει η θερμότητα της φωτιάς είναι μικρό. Αντίθετα, από την καύση αποδεκατίζονται οι πληθυσμοί των ωφελίμων αρπακτικών και παρασιτικών εντόμων που διαχειμάζουν στο έδαφος, τα οποία λόγω του μικροσκοπικού τους μεγέθους είναι ευάλωτα στη φωτιά. Τα ωφέλιμα έντομα είναι αυτά που κρατούν χαμηλά τους πληθυσμούς των εντόμων-εχθρών των καλλιεργειών (πράσινο σκουλήκι, πυραλίδα, σεζάμια, διαβρώτικα κλπ). Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι να μην επηρεάζονται οι πληθυσμοί των εχθρών της καλλιέργειας, με συνέπεια την αύξηση των προσβολών στην επόμενη καλλιεργητική περίοδο και λόγω του περιορισμένου παρασιτισμού από την καταστροφή των ωφελίμων.

III) Επιπτώσεις στη Δημόσια Υγεία

- **Αναπνευστικά Προβλήματα:** Η εισπνοή των μικροσωματιδίων και των τοξικών ουσιών που απελευθερώνονται κατά την καύση μπορεί να προκαλέσει αναπνευστικά προβλήματα, όπως βήχα, άσθμα, και άλλες χρόνιες πνευμονοπάθειες.
- **Καρκινογόνες Ουσίες:** Οι PAHs και άλλες τοξικές ουσίες που απελευθερώνονται κατά την καύση είναι καρκινογόνες και μπορεί να αυξήσουν

τον κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου σε άτομα που εκτίθενται συστηματικά σε αυτές.

4.1 Εναλλακτική διαχείριση γεωργικών υπολειμμάτων

Σύμφωνα με το ΦΕΚ 1450/2013 «βιομάζα» είναι οποιοδήποτε από τα ακόλουθα:

A) προϊόντα που αποτελούνται από οποιαδήποτε φυτική ύλη, προερχόμενη από τη γεωργία ή τη δασοκομία, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο προκειμένου να ανακτηθεί το ενεργειακό της περιεχόμενο,

B) τα εξής απόβλητα:

- Φυτικά απόβλητα της γεωργίας ή της δασοκομίας.
- Φυτικά απόβλητα της βιομηχανίας τροφίμων, εφόσον ανακτάται η εκλυόμενη θερμότητα.
- Ινώδη φυτικά απόβλητα από την παραγωγή παρθένου χαρτοπολτού και την παραγωγή χαρτιού από χαρτοπολτό, εφόσον για τα απόβλητα αυτά εφαρμόζεται διαδικασία συναποτέφρωσης στον τόπο παραγωγής και ανακτάται η εκλυόμενη θερμότητα, απόβλητα φελλού.
- Απόβλητα ξύλου εκτός από τα απόβλητα ξύλου που ενδέχεται να περιέχουν αλογονούχες οργανικές ενώσεις ή βαρέα μέταλλα ως αποτέλεσμα επεξεργασίας με συντηρητικά ξύλου ή επίστρωσης, και τα οποία περιλαμβάνουν ιδίως απόβλητα ξύλου προερχόμενα από οικοδομές και κατεδαφίσεις (www.ypeka.gr).

Τα φυτά μέσω της φωτοσύνθεσης μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε χημική και την αποθηκεύουν. Σε αυτό οφείλεται η ενέργεια που αποδίδει η βιομάζα κατά την αξιοποίηση της. Η βιομάζα είναι η μοναδική φυσική πηγή ενέργειας με άνθρακα που διαθέτει σημαντικά αποθέματα. Η φυτική βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί αρχικά για την κάλυψη διαφόρων ενεργειακών αναγκών. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με απευθείας καύση είτε με μετατροπή σε αέρια, υγρά ή στερεά βιοκαύσιμα. Η μετατροπή αυτή γίνεται είτε με θερμοχημικές διεργασίες, όπως η καύση, η πυρόλυση ή η αεριοποίηση είτε με βιοχημικές διεργασίες (αλκοολική ζύμωση, αερόβια ή αναερόβια χώνευση). Η επιλογή της κατάλληλης διεργασίας γίνεται ανάλογα με το είδος της διαθέσιμης ύλης (Bocci et al., 2014; Κιτσάρας 2017).

Η ποσότητα της φυτικής βιομάζας από τα υπολείμματα γεωργικών καλλιεργειών υπολογίζεται στην Ελλάδα περίπου στους 7.500.000 τόνους, ενώ η ποσότητα από τα υπολείμματα δασικής προέλευσης υπολογίζεται περίπου στους 2.700.000 τόνους. Η καύση είναι η πλέον διαδεδομένη διεργασία μετατροπής της βιομάζας σε θερμική και ηλεκτρική ενέργεια και αφορά στο 90% της ενέργειας από βιομάζα παγκοσμίως. Σε σχέση με τις υπόλοιπες θερμοχημικές διεργασίες

(αεριοποίηση και πυρόλυση) είναι η πλέον απλή και μπορεί εύκολα να ενταχθεί σε υπάρχουσες υποδομές παραγωγής και διανομής ενέργειας. Η έρευνα στον τομέα αυτό αφορά στην εξέλιξη της τεχνολογίας, την αύξηση των αποδόσεων, την περικοπή του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας και τον περιορισμό της εκπομπής αερίων ρύπων, προκειμένου να παραμείνει ανταγωνιστική με τις ανερχόμενες τεχνολογίες της αεριοποίησης και της πυρόλυσης. Η συνδυασμένη καύση βιομάζας και ορυκτών ανθράκων αποτελεί εναλλακτική με υψηλές αποδόσεις και περιορισμού των εκλυόμενων ρύπων. Η καύση βιομάζας αποσκοπεί είτε στην παραγωγή θερμότητας (οικιακή ή βιομηχανική) σε λέβητες, είτε στην συμπαραγωγή ηλεκτρικής θερμικής ισχύος με τη χρήση ατμοστρόβιλων (κύκλος Rankine). Τα υπολείμματα υφιστάμενων καλλιεργειών είναι σε θέση να καλύψουν περίπου το 8% του εθνικού ενεργειακού ισοζυγίου (5% αν δεν ληφθεί υπόψη το άχυρο δημητριακών και τα κλαδέματα καλαμποκιάς που χρησιμοποιούνται για ζωοτροφές) (Ειδικά Κεφάλαια Παραγωγής Ενέργειας, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας)

Κύριος άξονας της αξιοποίησης των οργανικών αποβλήτων είναι η ανακύκλωση. Με την επιτόπου εισαγωγή των αποβλήτων στον χώρο καλλιέργειας, το γνωστό και αλλιώς όργωμα, επιτυγχάνεται η συνέχιση του κύκλου των οργανικών στοιχείων λόγω της αποικοδόμησης που συμβαίνει. Είναι μια διαδικασία που έπεται του θεισμού και είναι βασικό στάδιο της καλλιέργειας. Ομοιάζει με την κομποστοποίηση με την διαφορά της εξοικονόμησης ενέργειας και πόρων μιας και η διάσπαση γίνεται στο σημείο όπου επρόκειτο να γίνει και η απορρόφηση, με την προϋπόθεση να μην γίνει άμεσα η επόμενη καλλιέργεια.

Μία επιπλέον λύση είναι η πρακτική της κομποστοποίησης. Η μέθοδος αυτή είναι διαδεδομένη κατά κύριο λόγο για την αξιοποίηση των οικιακών οργανικών απορριμμάτων, όπως τα υπολείμματα τροφών κατά την διάρκεια του μαγειρέματος. Δεν σημαίνει όμως ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη μέθοδος και σε μεγαλύτερη κλίμακα όπως η αξιοποίηση των γεωργικών αποβλήτων. Δημιουργώντας τις κατάλληλες συνθήκες, δίνεται ο χώρος και ο χρόνος στο έδαφος να ολοκληρώσει φυσικά την διαδικασία της αποικοδόμησης και να αποδεσμεύσει τα θρεπτικά συστατικά των, πλέον, άχρηστων υπολειμμάτων, δίνοντας πίσω χόμα που μπορεί να αξιοποιηθεί σε μελλοντική καλλιέργεια το οποίο είναι απαλλαγμένο από νιτρικά ιόντα και φωσφορικά άλατα, ρυπαντές που βρίσκονται στα λιπάσματα του εμπορίου. Δίνεται η δυνατότητα χρήσης βιολογικού λιπάσματος απαλλαγμένο από τα βαρέα μέταλλα, μη βιοδιασπώμενα συστατικά, βιοσυσσωρεύσιμα χημικά κατάλοιπα κι επιπλέον παθογόνα βακτηρία, επικίνδυνα για τον άνθρωπο, που βρίσκονται στις κοπριές (Sofia vizhimalar et al., 2022).

Ένας από τους παλαιότερους τρόπος εκμετάλλευσης των γεωργικών υπολειμμάτων είναι η χρήση τους ως ζωοτροφή. Βασική πτυχή της ύπαρξης αποβλήτων αποτελεί η διατροφή και ο λόγος που υπάρχουν απόβλητα εξ αρχής είναι η ανάγκη παραγωγής τροφίμων. Έτσι λοιπόν, η λήψη γεωργικών αποβλήτων και η μεταποίησή τους σε ζωοτροφή είναι η ευκολότερη και η πιο αποδοτική λύση, μιας και εξασφαλίζεται η απαραίτητη τροφή για τα ζώα από τα φαινομενικά ως σκουπίδια του

αγροτικού τομέα. Σχεδόν κάθε προϊόν φυτικής προέλευσης με υψηλή συγκέντρωση υγρασίας μπορεί να γίνει τροφή για τα παραγωγικά ζώα, μηρυκαστικά, οπληφόρα κ.α. Επί του παρόντος θέματος, τα αγροτικά υπολείμματα στην τελική τους μορφή ονομάζονται “πίτα” ή ενσίρωμα και μπορεί να παραχθεί από σιτηρά, καλαμπόκια, ζαχαρότευτλα, χόρτο και γενικώς οι ρίζες όλων των φυτών ακόμη και στελέχη βαμβακιού. Κατά τον θερισμό στο χωράφι απομένει το στέλεχος της καλλιέργειας (κοινώς κοτσάνι) το οποίο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αν δεν αφομοιωθεί κατά το όργωμα και αφού πλέον αποφεύγεται/απαγορεύεται η καύση, συλλέγεται και δένεται σε κυλινδρικά ή τετράγωνα δεμάτια για να γίνει ζωοτροφή (Muscat et al., 2020).

5. Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας

5.1 Ανάλυση των δεδομένων, αποτελέσματα και συζήτηση

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας ήταν η βιβλιογραφική ανασκόπηση των επιπέδων των ΠΑΥς που παράγονται από την καύση γεωργικών υπολειμμάτων σε ανοικτούς χώρους και η εκτίμηση κινδύνου στην ανθρώπινη υγεία από τις συγκεντρώσεις στην ατμόσφαιρα των παραπάνω ενώσεων.

Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής μπορούν να δώσουν βασικές πληροφορίες για την καλύτερη αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα και των επιπέδων των ΠΑΥς στην ατμόσφαιρα. Επίσης, μπορεί να δώσει λύσεις στην χρήση ορθολογικών πρακτικών για την διαχείριση των γεωργικών υπολειμμάτων.

Στην πλειοψηφία των δημοσιεύσεων, η ανάλυση των ΠΑΥς μετά την εκχύλιση του δείγματος με οργανικούς διαλύτες (συνήθως εξανίου) και τον καθαρισμό με στήλη χρωματογραφίας, έγινε με την τεχνική της αέριας χρωματογραφίας σε συνδυασμό με φασματογράφο μάζας (GC-MS) εκτός από τα δείγματα από το Πακιστάν (Khalid et al., 2023) και την Κίνα (Zhang et al., 2011) που η ανάλυση των δειγμάτων έγινε με την τεχνική της υγρής Χρωματογραφία Υψηλής Απόδοσης (HPLC - High Performance Liquid Chromatography), μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές ανάλυσης στην αναλυτική χημεία. Η HPLC χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό, την αναγνώριση και την ποσοτική ανάλυση των ΠΑΥς σε ένα μίγμα αλλά δεν μπορεί να αναλύσει μέλη με πολύ μικρό μοριακό βάρος όπως το Ναφθαλίνιο.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι δημοσιευμένες εργασίες που βρέθηκαν σε βάσεις δεδομένων (SCOPUS, Sciencedirect) και αναφέρουν αποτελέσματα μελετών με θέμα την παραγωγή των ΠΑΥς από ανοικτή καύση γεωργικών υπολειμμάτων. Στον Πίνακα 2 επίσης παρουσιάζονται οι χώρες που έγιναν οι μελέτες καθώς και η χρονολογία δειγματοληψίας. Υπάρχουν μελέτες από Ευρώπη, Ασία, Αφρική και Ν. Αμερική. Ένα πρώτο σχόλιο από τον Πίνακα 2 είναι ότι υπάρχουν ελάχιστες δημοσιεύσεις που ασχολούνται με την μελέτη των ΠΑΥς από την καύση γεωργικών υπολειμμάτων. Αυτό οφείλεται κυρίως σε τεχνικές δυσκολίες δειγματοληψίας. Οι δειγματολήπτες είναι συνήθως μεγάλου όγκου και χρειάζονται παροχή ηλεκτρικού ρεύματος για 24-48h (διάρκεια δειγματοληψίας). Είναι τεχνικά δύσκολο να βρεθεί σημείο με παροχή ρεύματος στις γεωργικές περιοχές που γίνεται καύση των υπολειμμάτων. Επίσης, ένα ακόμα τεχνικό πρόβλημα είναι ότι πρέπει να συντονιστούν χρονικά οι δειγματοληψίες με την περίοδο καύσης των υπολειμμάτων. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι για την Ελλάδα δεν υπάρχουν δημοσιευμένα δεδομένα για την μελέτη των ΠΑΥς από την καύση υπολειμμάτων γεωργικών δραστηριοτήτων και αποτελεί ερευνητική ευκαιρία που μπορεί να οδηγήσει σε δημοσίευση.

Ο Πίνακας 3 συγκρίνει τα επίπεδα των ΠΑΥς που παράγονται από την καύση διαφόρων τύπων γεωργικών υπολειμμάτων. Από τον Πίνακα 3 είναι εμφανές ότι η καύση υπολειμμάτων από διαφορετικά είδη καλλιέργειας, οδηγεί σε διαφορετικές εκπομπές ΠΑΥς. Η καύση βιομάζας, η σύνθεση της βιομάζας, η υγρασία και η θερμοκρασία καύσης, μπορεί να επηρεάσει την συγκέντρωση των παραγόμενων ΠΑΥς καθώς και το προφίλ των μελών (Wang et al., 2023). Υψηλότερες συγκεντρώσεις

παρατηρήθηκαν στις μελέτες της καύσης υπολειμμάτων καλλιεργειών με ρύζι στο Πακιστάν (Khalid et al., 2023) και στη Νιγηρία (Fakinle et al., 2022) καθώς και σε υπολείμματα καλλιεργειών καλαμποκιού στην ίδια χώρα (Διάγραμμα 1).

Πίνακας 2: Τα χαρακτηριστικά των δημοσιεύσεων που αναφέρουν τις συγκεντρώσεις ΠΑΥς από την καύση γεωργικών υπολειμμάτων

A/A	ΧΩΡΑ	ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗΣ Ή ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ	Είδος καλλιέργειας	βιβλιογραφική πηγή
1	Λευκορωσία	2003	υπολείμματα ντομάτας και πατάτας	Kakareka and Kukharchyk 2003
2	Λευκορωσία	2003	καλαμπόκι	Kakareka and Kukharchyk 2003
3	Λευκορωσία	2003	φασόλι	Kakareka and Kukharchyk 2003
4	Λευκορωσία	2003	αχυρο	Kakareka and Kukharchyk 2003
5	Βραζιλία	2004	ζαχαροκάλαμο	Godoi et al., 2004
6	Ταϊλάνδη	2020	σιτηρά (διαφορετικά είδη)	ChooChuay et al., 2020
7	Κίνα	2010	ρύζι	Zhang et al., 2011
8	Κίνα	2010	καλαμπόκι	Zhang et al., 2011
9	Κίνα	2010	Άχυρο	Zhang et al., 2011
10	Νιγηρία	2020	καλαμπόκι	Fakinle et al., 2022
11	Νιγηρία	2020	καλαμπόκι	Fakinle et al., 2022
12	Νιγηρία	2020	ρύζι	Fakinle et al., 2022
13	Νιγηρία	2020	φασόλι	Fakinle et al., 2022
14	Κίνα	2022	ρύζι	Wang et al., 2023
15	Κίνα	2022	ανανάς	Wang et al., 2023
16	Κίνα	2022	σιτάρι	Wang et al., 2023
17	Πακιστάν	2020	ρύζι (διαφορετικές ποικιλίες)	Khalid et al., 2023
18	Πακιστάν	2020	ρύζι (διαφορετικές ποικιλίες)	Khalid et al., 2023
19	Πακιστάν	2020	ρύζι (διαφορετικές ποικιλίες)	Khalid et al., 2023
20	Ισπανία	2002	σιτηρά (διαφορετικά είδη)	Conde et al., 2005
21	Ισπανία	2002	σιτηρά (διαφορετικά είδη)	Conde et al., 2005
22	Ισπανία	2002	σιτηρά (διαφορετικά είδη)	Conde et al., 2005
23	Ισπανία	2002	σιτηρά (διαφορετικά είδη)	Conde et al., 2005

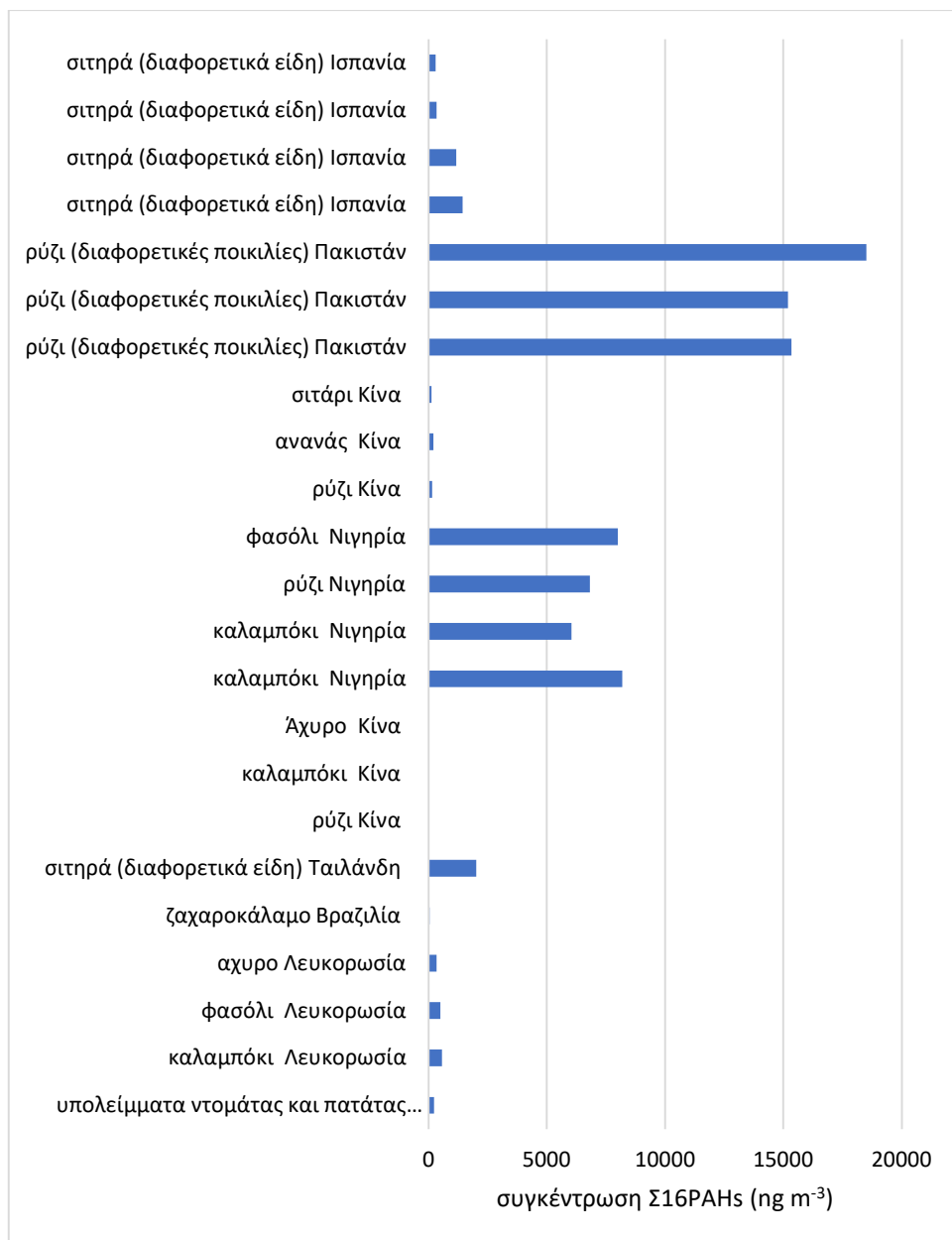
Πίνακας 3: Οι Συγκεντρώσεις των ΠΑΥς ($\mu\text{g m}^{-3}$) από την καύση γεωργικών υπολειμμάτων

A/A	ΧΩΡΑ	NAP	Acy	Ace	F	Ph	An	Fl	Py	B[a]An	Chry	B[b]Fl	B[k]Fl	B[a]Py	I[1,2,3-cd]Py	dB[a,h]An	B[ghi]Pe	Σ_{16} PAHs	βιβλιογραφική πηγή
1	Λευκορωσία	5.4	20.1	2.1	0.2	124.8	20.7	29.5	8.5	16.6	7.2	0	0	3.1	0	0	0.9	239.1	Kakareka and Kukharchyk 2003
2	Λευκορωσία	26.5	74.5	16.3	96.8	189.7	60.7	44.7	21.4	16.3	8.6	5.3	1.6	4.6	2.3	0	1.7	571	Kakareka and Kukharchyk 2003
3	Λευκορωσία	37.3	28.5	8.6	88.3	160.5	57.8	53.3	20.3	15.8	5.9	5.9	1.4	9.4	0	0	2.2	495.2	Kakareka and Kukharchyk 2003
4	Λευκορωσία	31.8	12.4	8.9	59.7	106.6	32.9	33	16.4	12.5	5.7	5.5	1.3	5.6	0	0	2.1	334.4	Kakareka and Kukharchyk 2003
5	Βραζιλία	0.42	0.95	0.7	0.42	2.9	0.33	3.3	2.5	0.74	6.6	5.6	1.9	2.7	8.7	0	8.5	46.26	Godoi et al., 2004
6	Ταϊλάνδη			40	32	125	20	54	54	123	52	177	203	170	468	398	104	2020	ChooChuay et al., 2020
7	Κίνα	0.01	0.02	0.02	0.01	0.33	0.04	0.27	0.23	0.06	0.17	0.04	0.08	0.1	0.14	0.12	0.13	1.77	Zhang et al., 2011
8	Κίνα	0	0.03	0.11	0.04	0.17	0.07	0.17	0.11	0.01	0.13	0.04	0.05	0	0	0	0	0.93	Zhang et al., 2011
9	Κίνα	0	0.03	0.14	0.02	0.09	0.06	0.14	0.11	0	0.07	0.02	0.04	0	0	0	0	0.72	Zhang et al., 2011
10	Νιγηρία	1050	1020	30	1000	40	20	40	130	20	1320	960	20	10	1060	1470		8190	Fakinle et al., 2022
11	Νιγηρία	10	90	310	1000	1210	110	150	130	1020	1360	560	20	20	30	20		6040	Fakinle et al., 2022
12	Νιγηρία	1020	1000	30	260	320	30	40	630	670	1400	1370	30	10	10			6820	Fakinle et al., 2022
13	Νιγηρία	10		30		20	490	610	830	820	1320	820	740	1180	540	580	10	8000	Fakinle et al., 2022
14	Κίνα	37.77	1.05	9.05	1.56	10.16	2.22	21.92	23.92	6.66	6.53	8.86	2.4	9.19	6.29	0.54	5.82	153.94	Wang et al., 2023
15	Κίνα	69.78	0.67	23.99	2.97	11.97	3.39	24.22	23.55	7.46	7.45	10.79	2.98	10.42	6.43	0.78	5.69	212.54	Wang et al., 2023
16	Κίνα	52.95	0.67	13.19	2.36	7.93	1.95	11.71	11.03	4.16	3.81	5.27	1.26	4.83	5.9	0.5	4.17	131.69	Wang et al., 2023
17	Πακιστάν					112	9	3452	53	69	1262	731	262	6779	540	1980	89	15338	Khalid et al., 2023
18	Πακιστάν					123	33	2687	36	74	962	576	188	7300	839	2285	91	15194	Khalid et al., 2023
19	Πακιστάν					114	14	3398	56	84	1222	699	207	10,327	518	1787	88	18514	Khalid et al., 2023
20	Ισπανία	707	178	25	111	233	51	27	22	22	19	22	n.d.	14	6	n.d.	4	1441	Conde et al., 2005

A/A	ΧΩΡΑ	NAP	Acy	Ace	F	Ph	An	Fl	Py	B[a]An	Chry	B[b]Fl	B[k]Fl	B[a]Py	I[1,2,3-cd]Py	dB[a,h]An	B[ghi]Pe	Σ ₁₆ PAHs	βιβλιογραφική πηγή
21	Ισπανία	694	128	16	78	126	28	24	22	16	10	17	n.d.	10	2	n.d.	3	1174	Conde et al., 2005
22	Ισπανία	210	29	4	17	31	9	11	10	10	6	6	n.d.	4	n.d.	n.d.	n.d.	347	Conde et al., 2005
23	Ισπανία	148	29	5	30	45	14	8	6	8	3	4	n.d.	4	n.d.	n.d.	n.d.	304	Conde et al., 2005

Πίνακας 4: Στατιστικά στοιχεία για τις συγκεντρώσεις των μελών ΠΑΥς από την καύση γεωργικών υπολειμμάτων ($ng\ m^{-3}$)

	NAP	Acy	Ace	F	Ph	An	Fl	Py	B[a]An	Chry	B[b]Fl	B[k]Fl	B[a]Py	I[1,2,3-cd]Py	dB[a,h]An	B[ghi]Pe	Σ ₁₆ PAHs
Μέση τιμή	216.4	145.2	28.7	146.3	135.4	43.8	466.2	91.6	131.1	390.8	260.4	88.6	1125.1	192.5	473.4	23.3	3720.4
Διάμεση τιμή	37.3	24.3	11.1	30.0	106.6	20.0	29.5	22.0	16.0	7.5	8.9	2.4	9.4	6.3	0.5	4.1	495.2
Ελάχιστη τιμή	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7
Μέγιστη τιμή	1050.0	1020.0	310.0	1000.0	1210.0	490.0	3452.0	830.0	1020.0	1400.0	1370.0	740.0	10327.0	1060.0	2285.0	104.0	18514.0
Τυπική απόκλιση	358.5	318.6	67.3	307.5	249.1	100.7	1089.1	206.7	286.1	595.3	405.2	180.8	2846.0	325.7	802.8	38.5	5693.6

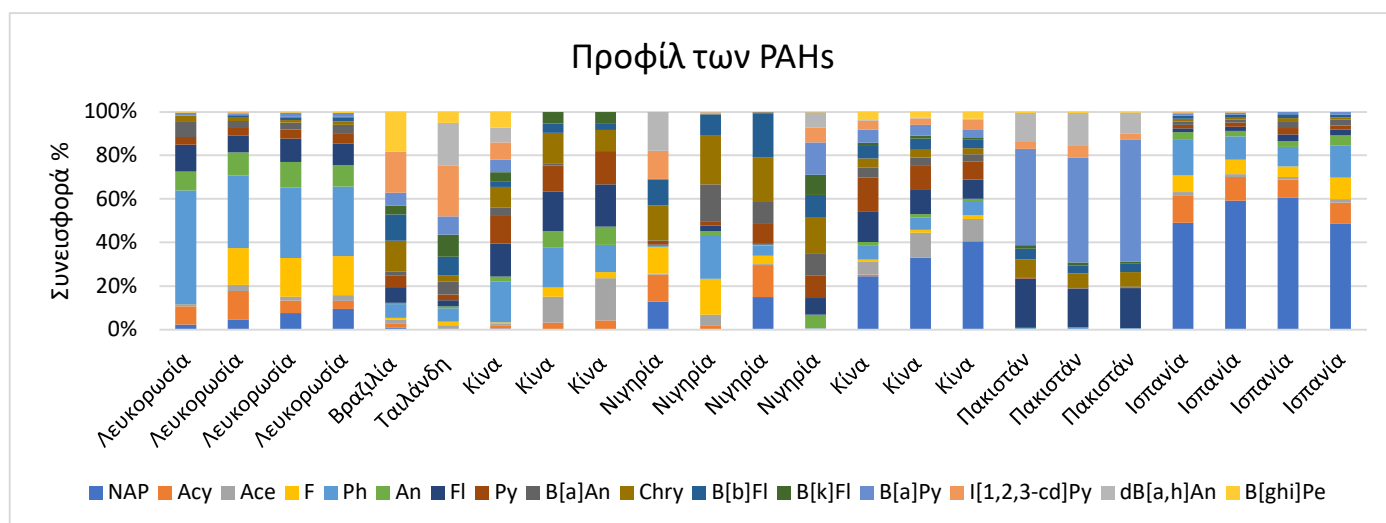


Διάγραμμα 1: Οι Συγκεντρώσεις των ΠΑΥς (ng m⁻³) από την καύση γεωργικών υπολειμμάτων ανα καλλιέργεια

Οι συγκεντρώσεις των Σ₁₆PAHs κυμάνθηκαν μεταξύ 0.7 ng m⁻³ και 18514 ng m⁻³. Η μέση τιμή των συγκεντρώσεων ήταν 3720 ng m⁻³ και η διάμεση συγκέντρωση τα 495 ng m⁻³. Η μεγάλη διαφοροποίηση μεταξύ της μέσης και διάμεσης τιμής οφείλεται στην μεγάλη διακύμανση των συγκεντρώσεων στην παγκόσμια βιβλιογραφία (τυπική απόκλιση 5694 ng m⁻³) (Πίνακας 4).

5.2 Προφίλ των PAHs

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το προφίλ των ΠΑΥς στα δείγματα αέρα και σωματιδίων σύμφωνα με τα δεδομένα της παγκόσμιας βιβλιογραφίας. Το προφίλ των ΠΑΥς είναι το ποσοστό συνεισφοράς (%) κάθε μέλους των ΠΑΥς στο συνολικό άθροισμα των Σ_{16} PAHs στα ατμοσφαιρικά δείγματα που πάρθηκαν κατά την καύση γεωργικών υπολειμμάτων. Σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα, παρατηρούμε πως στις περισσότερες χώρες σημεία δειγματοληψίας επικρατούν κυρίως τέσσερα μέλη. Συγκεκριμένα, η ένωση με την μεγαλύτερη συνεισφορά στις συνολικές συγκεντρώσεις που παρουσιάστηκαν στις δημοσιεύσεις είναι το B[a]Py (30%), το dB[a,h]An και το Fl (13%) και το Chry (10%). Οι υπόλοιπες ενώσεις είχαν συνεισφορά από 1% έως 7%. Τα μέλη με την μεγαλύτερη συνεισφορά παράγονται από την καύση βιομάζας και είναι χαρακτηριστικοί δείκτες για την πηγή αυτή.



Διάγραμμα 2: Προφίλ των PAHs στα δείγματα αέρα

5.3 Εκτίμηση Έκθεσης και Κινδύνου για την Υγεία

Η μέθοδος των τοξικών ισοδύναμων συγκεντρώσεων (TEQ) υιοθετήθηκε για την εκτίμηση του κινδύνου της ανθρώπινης έκθεσης στους ΠΑΥς. Οι συγκεντρώσεις TEQ υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$TEQ = \sum(C_i \times TEF_i) \quad (1)$$

όπου,

C_i είναι η συγκέντρωση ενός μεμονωμένου ΠΑΥς στα δείγματα και το TEF_i είναι τα τοξικά ισοδύναμα της ένωσης σε σύγκριση με το BaP. Οι τιμές TEF για τους ΠΑΥς αντλήθηκαν από τους Nisbet και LaGoy (1992) (Πίνακας 5).

Πίνακας 5: Τοξικά ισοδύναμα των μελών των ΠΑΥς σε σχέση με το μέλος *BaP*

PAHs	TEF
NAP	0.001
ACY	0.001
ACE	0.001
FLN	0.001
PHE	0.001
ANT	0.01
FLT	0.001
PYR	0.001
BaA	0.1
CHR	0.01
BbF	0.1
BkF	0.1
BaP	1
IcdP	0.1
dBahA	5
BghiP	0.01

5.3.1 Εκτίμηση μη καρκινογόνου κινδύνου

Ο δείκτης κινδύνου (Hazard Index - HI) υπολογίστηκε από την Εξίσωση (2) ως το δείκτη κινδύνου (Hazard Quotients - HQ) από την εισπνοή. Ο δείκτης κινδύνου (HQ), που είναι ο λόγος μεταξύ της εκτιμώμενης ημερήσιας έκθεσης (χρόνια ημερήσια δόση, CDI) και της στοματικής δόσης αναφοράς (RfD), υπολογίστηκε από την Εξίσωση (3). Οι τιμές RfD πάρθηκαν από την US EPA (2006) (Πίνακας). Η χρόνια ημερήσια δόση (CDI) μέσω εισπνοής υπολογίστηκε από την εξίσωση (4) (US EPA 1989; US EPA, 2001; US EPA, 2009; Iwegbue et al., 2019) για ενήλικες (παραγωγούς, εργαζόμενους).

$$\text{Hazard index HI} = \text{HQ}_{\text{inh}} \quad (2)$$

$$\text{HQ} = \frac{\text{CDI}_{\text{nc}}}{\text{RfD}} \quad (3)$$

$$\text{CDI}_{\text{inh-nc}} = \frac{C \times \text{InhR} \times \text{EF} \times \text{ET} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}_{\text{nc}} \times \text{PEF}} \quad (4)$$

5.3.2 Εκτίμηση καρκινογόνου κινδύνου

Ο καρκινογόνος κίνδυνος λόγω έκθεσης σε PAHs μέσω, εισπνοής εκτιμήθηκε σύμφωνα με την εξίσωση που δίνεται από την US EPA (2006).

$$ILCR_{inh} = \frac{C \times InhR \times EF \times ET \times ED \times IUR}{BW \times AT_{ca}} \quad (5)$$

Στις Εξισώσεις (4) και (5), το C είναι η τοξική ισοδύναμη συγκέντρωση (TEQ) σε σχέση με το BaP (ng m⁻³). Το InhR είναι ο ρυθμός εισπνοής αέρα (20 m³ d⁻¹), το EF είναι η συχνότητα έκθεσης (350 d y⁻¹), το ED είναι η διάρκεια έκθεσης (30 y), το ET είναι ο χρόνος έκθεσης (8h ανά ημέρα), το BW είναι το μέσο σωματικό βάρος (70 Kg) και τα ATnc (10950 ημέρες) και ATc (25,550 ημέρες) είναι οι ημέρες κατά τις οποίες η έκθεση υπολογίζεται για μη καρκινογόνο και καρκινογόνο κίνδυνο, αντίστοιχα. Το PEF είναι ο παράγοντας εκπομπής σωματιδίων (1.36 × 10⁹ m³ kg⁻¹), και το IUR είναι ο κίνδυνος μέσω εισπνοής (1x10⁻⁷ για όλα τα μέλη εκτός από το Chry (1x10⁻⁸), BaP και DBahA (1x10⁻⁶) (USEPA 2001, 2006, 2010,2011, 2012, 2017; USEPA IRIS, 2008, 2016); Iwegbue et al., 2019).

Πίνακας 6: Οι τιμές δια του στόματος δόσης αναφοράς (RfD) για τα μέλη των ΠΑΥς

Μέλος ΠΑΥς	RfD (mg/kg/day)
NAP	0.02
ACY	0.06
ACE	0.06
FLN	0.04
PHE	0.0071
ANT	0.3
FLT	0.04
PYR	0.03
BaP	0.0003

PAHs: Δεδομένα από τους Iwegbue et al. (2019).

5.3.3 Μη καρκινικός κίνδυνος

Σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7) η έκθεση μέσω εισπνοής είναι αρκετά μικρή. Η διάμεση τιμή HI ήταν πολύ μικρότερη από 1, υποδεικνύοντας ότι η έκθεση σε ΠΑΥς από την καύση γεωργικών υπολειμμάτων δεν ενέχει δυνητικό κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία.

Πίνακας 7: : Αξιολόγηση μη καρκινικού κινδύνου

HQinh	Np	Acy	Ace	F	Ph	An	Fl	Py	B[a]Py	ΣΡΑΗs
5th percentile	2.3E-06	6.4E-08	2.4E-07	6.4E-08	3.5E-06	2.7E-08	6.0E-07	5.5E-07	4.2E-05	4.94E-05
median	2.5E-04	5.4E-05	2.5E-05	1.0E-04	2.0E-03	8.9E-06	9.9E-05	9.8E-05	7.2E-03	9.88E-03
95th percentile	6.9E-03	2.2E-03	1.2E-04	3.4E-03	5.9E-03	4.7E-05	1.1E-02	2.6E-03	3.6E-01	3.96E-01

5.3.4 Κίνδυνος καρκίνου

Ο συνολικός κίνδυνος καρκινογένεσης μέσω της εισπνοής ήταν 2.4×10^{-12} (διάμεση τιμή) για τους ΠΑΥς. Για όλα τα μέλη των ΠΑΥς, ο συνολικός κίνδυνος καρκινογένεσης ήταν πολύ μικρός εντός του ασφαλούς (αποδεκτού) ορίου από $\leq 10^{-6}$ (USEPA, 2010; Iwegbue et al., 2019).

Σημειώνεται ότι η πραγματική συνολική ημερήσια πρόσληψη των ΠΑΥς και η συσχέτιση της με τον κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία δεν μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια. Απαιτούνται μελέτες μεγάλης κλίμακας για την κατανόηση της χημικής ρύπανσης και των επιπτώσεων της μακροχρόνιας έκθεσης και από άλλες πηγές.

Πίνακας 8: : Αξιολόγηση καρκινικού κινδύνου

ILCRinh	B[a]An	Chry	B[b]Fl	B[k]Fl	B[a]Py	I[1,2,3-cd]Py	dB[a,h]An	ΣΡΑΗs
5th percentile	1.12E-16	1.64E-16	2.32E-16	4.65E-16	9.69E-15	0.00E+00	0.00E+00	1.07E-14
median	1.93E-13	1.04E-14	1.39E-13	3.10E-14	1.20E-12	8.21E-13	6.97E-15	2.40E-12
95th percentile	9.75E-12	1.76E-12	1.29E-11	4.00E-12	1.04E-09	1.13E-10	2.64E-11	1.21E-09

6. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν τα επίπεδα των ΠΑΥς στην σωματιδιακή φάση από την ανοικτή καύση γεωργικών υπολειμμάτων. Όπως αναφέρθηκε εκτενώς οι ΠΑΥς έχουν πάρα πολλές πηγές και υπάρχουν σε όλα τα περιβαλλοντολογικά δείγματα με αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία. Αρκετοί ΠΑΥς βρίσκονται στον κατάλογο επικίνδυνων ρύπων και επιχειρείται ο περιορισμός τους. Συμπερασματικά, θα πρέπει να ακολουθούνται οι θεσμοθετημένες αρχές προφύλαξης ώστε να περιοριστεί η έκθεση του ανθρώπινου οργανισμού σε αυτές τις χημικές ουσίες.

Οι συγκεντρώσεις των Σ_{16} PAHs κυμάνθηκαν μεταξύ 0.7 ng m^{-3} και 18514 ng m^{-3} . Η μέση τιμή των συγκεντρώσεων ήταν 3720 ng m^{-3} και η διάμεση συγκέντρωση τα 495 ng m^{-3} . Η μεγάλη διαφοροποίηση μεταξύ της μέσης και διάμεσης τιμής οφείλεται στην μεγάλη διακύμανση των συγκεντρώσεων στην παγκόσμια βιβλιογραφία (τυπική απόκλιση 5694 ng m^{-3}). Παρατηρήθηκαν υψηλότερες συγκεντρώσεις σε καλλιέργειες ρυζιού και καλαμποκιού στο Πακιστάν και στην Νιγηρία. Κυρίαρχες ενώσεις για τους ΠΑΥς ήταν το B[a]Py, το dB[a,h]An, το Fl και το Chry με συνολική συνεισφορά στο άθροισμα των 16 ΠΑΥς στο 76%. Όλα τα παραπάνω μέλη είναι χαρακτηριστικά της καύσης βιομάζας. Η κατάποση είναι η σημαντικότερη οδός έκθεσης και ο μη καρκινικός και καρκινικός κίνδυνος για την ανθρώπινη υγεία από την έκθεση στους ΠΑΥς μέσω της εισπνοής εκτιμήθηκε πολύ χαμηλός.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Α) Ελληνική

Αδαμαντιάδου Σμ., Γεωργάτου Μ., Γιαπιτζάκης Χ., Λάκκα Λ, Νοταράς Δ., Φλωρέντιν Δ., Χατζηγεωργίου Γ., Χατζηκωστή Ολ., 2014, Άνθρωπος και Περιβάλλον. Στο Καλαϊτζάκη Μ., Πανταζίδης Γ. (Επιμ.) *Βιολογία Β΄ Λυκείου Γενικής Παιδείας*,(σ. 84-91) ΙΤΥΕ Διόφαντος , Αθήνα

Ζωντάνου Χρ., 2017. *Μελέτη των Συγκεντρώσεων των Πολυκυκλικών Αρωματικών Υδρογονανθράκων (PAHs) σε Σκόνη Εσωτερικών Χώρων*, Πτυχιακή Εργασία, Σχολή Θετικών Επιστημών Τμήμα Χημείας, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη

Κιτσάρα Α., 2017. *Νομοθετικό πλαίσιο και τεχνικές προδιαγραφές της καύσης στερεών απορριμάτων και της λυματολάσσης στην Ευρώπη και στην Ελλάδα*, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δ.Π.Θ., Ξάνθη.

Λαζαρίδης Μ., 2010. *Ατμοσφαιρική ρύπανση με στοιχεία μετεωρολογίας*. Εκδόσεις Τζιόλα.

Ουρανός Γ., 2013. *Οι Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες στα Τρόφιμα, Νομοθεσία και Μέθοδος Προσδιορισμού*, Πτυχιακή Εργασία, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας Τμήμα Τεχνολογίας Γεωργικών Προϊόντων, Καλαμάτα

Φυτιάνος Κ., Σαμαρά – Κωνσταντίνου Κ., 2009. *Χημεία Περιβάλλοντος*. Εκδόσεις UNIVERSITY STUDIO PRESS, Θεσσαλονίκη.

Χατζησπύρου Σ., 2007. *Χημεία ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος*. Τμήμα Εκδόσεων, Θεσσαλονίκη.

Χρυσίκου Λ., 2009. *Μελέτη της κατανομής και της βιοδραστικότητας σωματιδιακών οργανικών ρύπων στην ατμόσφαιρα αστικών περιοχών. Διδακτορική διατριβή*. Τμήμα Χημείας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Β) Αγγλική

Azimi, S., Rocher, V., Muller, M., Moilleron, R., Thevenot, D.R., 2005. Sources, distribution and variability of hydrocarbons and metals in atmospheric deposition in an urban area (Paris, France). *Sci. Total Environ.* 337, 223–239.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.06.020>

Besis, A., Avgenikou, A., Pantelaki, I., Serafeim, E., Georgiadou, E., Voutsas, D., Samara, C., 2023. Hazardous organic pollutants in indoor dust from elementary schools and kindergartens in Greece: Implications for children's health.

Chemosphere 310, 136750.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136750>

Besis, A., Botsaropoulou, E., Balla, D., Voutsas, D., Samara, C., 2021. Toxic organic pollutants in Greek house dust: Implications for human exposure and health risk. *Chemosphere* 284, 131318.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131318>

Besis, A., Gallou, D., Avgenikou, A., Serafeim, E., Samara, C., 2022. Size-dependent in vitro inhalation bioaccessibility of PAHs and O/N PAHs - Implications to inhalation risk assessment. *Environ. Pollut.* 301, 119045.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119045>

Besis, A., Tsolakidou, A., Balla, D., Samara, C., Voutsas, D., Pantazaki, A., Choli-Papadopoulou, T., Lialiaris, T.S., 2017. Toxic organic substances and marker compounds in size-segregated urban particulate matter - Implications for involvement in the in vitro bioactivity of the extractable organic matter. *Environ. Pollut.* 230. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.06.096>

Bocci, E., Sisinni, M., Moneti, M., Vecchione, L., Di Carlo, A., Villarini, M., 2014. State of Art of Small Scale Biomass Gasification Power Systems: A Review of the Different Typologies. *Energy Procedia* 45, 247–256.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.027>

ChooChuay, C., Pongpiachan, S., Tipmanee, D., Deelaman, W., Iadtem, N., Suttinun, O., Wang, Q., Xing, L., Li, G., Han, Y., Hashmi, M.Z., Palakun, J., Poshyachinda, S., Aukkaravittayapun, S., Surapipith, V., Cao, J., 2022. Effects of Agricultural Waste Burning on PM_{2.5}-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Carbonaceous Compositions, and Water-Soluble Ionic Species in the Ambient Air of Chiang-Mai, Thailand. *Polycycl. Aromat. Compd.* 42, 749–770. <https://doi.org/10.1080/10406638.2020.1750436>

Conde, F.J., Ayala, J.H., Afonso, A.M., González, V., 2005. Emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons from combustion of agricultural and silvicultural debris. *Atmos. Environ.* 39, 6654–6663.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.07.043>

Dai, Y., Xu, X., Huo, X., Faas, M.M., 2023. Effects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on pregnancy, placenta, and placental trophoblasts. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 262, 115314.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115314>

Degrendele, C., Kanduč, T., Kocman, D., Lammel, G., Cambelová, A., Dos Santos, S.G., Horvat, M., Kukučka, P., Holubová Šmejkalová, A., Mikeš, O., Nuñez-Corcuera, B., Příbylová, P., Prokeš, R., Saňka, O., Maggos, T., Sarigiannis, D., Klánová, J., 2021. NPAHs and OPAHs in the atmosphere of two central European cities: Seasonality, urban-to-background gradients, cancer risks and gas-to-particle partitioning. *Sci. Total Environ.* 793, 148528.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148528>

- Elzein, A., Stewart, G.J., Swift, S.J., Nelson, B.S., Crilley, L.R., Alam, M.S., Reyes-Villegas, E., Gadi, R., Harrison, R.M., Hamilton, J.F., Lewis, A.C., 2020. A comparison of PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in summer Beijing (China) and Delhi (India). *Atmos. Chem. Phys.* 20, 14303–14319. <https://doi.org/10.5194/acp-20-14303-2020>
- Fakinle, B.S., Odekanle, E.L., Ike-Ojukwu, C., Sonibare, O.O., Falowo, O.A., Olubiyo, F.W., Oke, D.O., Aremu, C.O., 2022. Quantification and health impact assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) emissions from crop residue combustion. *Heliyon* 8, e09113. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09113>
- Godoi, R.H.M., Godoi, A.F.L., Worobiec, A., Andrade, S.J., de Hoog, J., Santiago-Silva, M.R., Grieken, R. Van, 2004. Characterisation of Sugar Cane Combustion Particles in the Araraquara Region, Southeast Brazil. *Microchim. Acta* 145, 53–56. <https://doi.org/10.1007/s00604-003-0126-x>
- Iwegbue, C.M.A., Eyengho, S.B., Egobueze, F.E., Odali, E.W., Tesi, G.O., Nwajei, G.E., Martincigh, B.S., 2019. Polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated biphenyls in indoor dust from electronic repair workshops in southern Nigeria: Implications for onsite human exposure. *Sci. Total Environ.* 671, 914–927. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.449>
- Jakovljević, I., Sever Štrukil, Z., Godec, R., Bešlić, I., Davila, S., Lovrić, M., Pehnc, G., 2020. Pollution Sources and Carcinogenic Risk of PAHs in PM(1) Particle Fraction in an Urban Area. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17. <https://doi.org/10.3390/ijerph17249587>
- Kakareka, S. V, Kukharchyk, T.I., 2003. PAH emission from the open burning of agricultural debris. *Sci. Total Environ.* 308, 257–261. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00650-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00650-2)
- Kampa, M., Castanas, E., 2008. Human health effects of air pollution. *Environ. Pollut.* 151, 362–367. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012>
- Khalid, Asma, Guerriero, E., Cerasa, M., Mahmood, T., Khalid, Azeem, Paris, E., Mosca, S., Gallucci, F., 2023. Estimation Inventories of Persistent Organic Pollutants from Rice Straw Combustion as an Agricultural Waste. *Fire* 6. <https://doi.org/10.3390/fire6120459>
- Kim, K.-H., Jahan, S.A., Kabir, E., Brown, R.J.C., 2013. A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects. *Environ. Int.* 60, 71–80. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.07.019>
- Lammel, G., Kitanovski, Z., Kukučka, P., Novák, J., Arangio, A.M., Codling, G.P., Filippi, A., Hovorka, J., Kuta, J., Leoni, C., Příbylová, P., Prokeš, R., Sánka, O., Shahpoury, P., Tong, H., Wietzoreck, M., 2020. Oxygenated and Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Ambient Air—Levels, Phase Partitioning,

- Mass Size Distributions, and Inhalation Bioaccessibility. *Environ. Sci. Technol.* 54, 2615–2625. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06820>
- Lehtinen, K.E.J., Kulmala, M., 2003. A model for particle formation and growth in the atmosphere with molecular resolution in size. *Atmos. Chem. Phys.* 3, 251–257. <https://doi.org/10.5194/acp-3-251-2003>
- McNeill, V.F., 2017. Atmospheric Aerosols: Clouds, Chemistry, and Climate. *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.* 8, 427–444. <https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-060816-101538>
- Mu, Z., Chen, Q., Zhang, L., Guan, D., Li, H., 2021. Photodegradation of atmospheric chromophores: changes in oxidation state and photochemical reactivity. *Atmos. Chem. Phys.* 21, 11581–11591. <https://doi.org/10.5194/acp-21-11581-2021>
- Muscat, A., de Olde, E.M., de Boer, I.J.M., Ripoll-Bosch, R., 2020. The battle for biomass: A systematic review of food-feed-fuel competition. *Glob. Food Sec.* 25, 100330. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100330>
- Nisbet, I.C.T., LaGoy, P.K., 1992. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 16, 290–300, [https://doi.org/10.1016/0273-2300\(92\)90009-X](https://doi.org/10.1016/0273-2300(92)90009-X),
- Ono, K., Mizushima, Y., Furuya, M., Kunihisa, R., Tsuchiya, N., Fukuma, T., Iwata, A., Matsuki, A., 2020. Direct Measurement of Adhesion Force of Individual Aerosol Particles by Atomic Force Microscopy. *Atmosphere (Basel)*. 11. <https://doi.org/10.3390/atmos11050489>
- Satheesh, S.K., Krishna Moorthy, K., 2005. Radiative effects of natural aerosols: A review. *Atmos. Environ.* 39, 2089–2110. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.12.029>
- Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N., 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Serafeim, E., Basis, A., Kouras, A., Farias, C.N., Yera, A.B., Pereira, G.M., Samara, C., de Castro Vasconcellos, P., 2023. Oxidative potential of ambient PM_{2.5} from São Paulo, Brazil: Variations, associations with chemical components and source apportionment. *Atmos. Environ.* 119593. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119593>
- Shao, L., Liu, P., Jones, T., Yang, S., Wang, W., Zhang, D., Li, Y., Yang, C.-X., Xing, J., Hou, C., Zhang, M., Feng, X., Li, W., Bérubé, K., 2022. A review of atmospheric individual particle analyses: Methodologies and applications in environmental research. *Gondwana Res.* 110, 347–369. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.01.007>
- Sofia vizhimalar, A., Vasanthi, M., Thamaraiselvi, C., Biruntha, M., Paul, J.A.J., Thirupathi, A., Chang, S.W., Xu, Z., Al-Rashed, S., Munuswamy-Ramanujam, G., Ravindran, B., 2022. Greener production of compost from agricultural

- biomass residues amended with mule dung for agronomic application. *Chemosphere* 288, 132561.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132561>
- Strandberg, B., Julander, A., Sjöström, M., Lewné, M., Hatice, K.A., Bigert, C., 2018. An improved method for determining dermal exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons. *Chemosphere* 198, 274–280.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.104>
- Teixeira, J., Bessa, M.J., Delerue-Matos, C., Sarmento, B., Santos-Silva, A., Rodrigues, F., Oliveira, M., 2024. Firefighters' personal exposure to gaseous PAHs during controlled forest fires: A case study with estimation of respiratory health risks and in vitro toxicity. *Sci. Total Environ.* 908, 168364.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168364>
- UNEP/POPS/COP.4/17, 2009. Recommendations of the Persistent Organic Pollutants Review Committee of the Stockholm Convention to Amend Annexes A, B or C of the Convention. Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants, Stockholm.
- USEPA, 1989. Risk assessment guidance for superfund. EPA/540/1–89/002. In: Human Health Evaluation Manual, vol. I. Environmental Protection Agency, Washington DC.
- USEPA, 2001. Risk assessment guidance for superfund. In: Process for Conducting Probabilistic Risk Assessment, vol. III. D.U.E.P.A., Washington.
- USEPA, 2006. Integrated Risk Information System. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- USEPA, 2009. Risk assessment guidance for superfund. In: Human Health Evaluation Manual (F, Supplemental Guidance for Inhalation Risk Assessment) EPA/540/R/070/002, vol. I. Environmental Protection Agency, Washington DC.
- USEPA, 2010. Regional screening levels (RSL) tables. In: Risk-based Standards for Kansas (RSK) Manual, 5th Version. Kansas Department of Health and Environment (KDHE), Bureau of Environmental Remediation, Topeka, KS.
- USEPA, 2011. Regional Screening Level Table (RSL) for Chemical Contaminants at Superfund Sites. U.S. Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA.
- Wang, J., Jiang, H., Chen, Y., Han, Y., Cai, J., Peng, Y., Feng, Y., 2023. Emission characteristics and influencing mechanisms of PAHs and EC from the combustion of three components (cellulose, hemicellulose, lignin) of biomasses. *Sci. Total Environ.* 859, 160359.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160359>
- Whitby, C., Ferguson, R.M.W., Colbeck, I., Dumbrell, A.J., Nasir, Z.A., Marczylo, E., Kinnersley, R., Douglas, P., Drew, G., Bhui, K., Lemon, M., Jackson, S.,

Tyrrel, S., Coulon, F., 2022. Chapter Three - Compendium of analytical methods for sampling, characterization and quantification of bioaerosols, in: Bohan, D.A., Dumbrell, A. (Eds.), Functional Microbiomes, Advances in Ecological Research. Academic Press, pp. 101–229.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2022.09.004>

Wise, S.A., Sander, L.C., Schantz, M.M., 2015. Analytical Methods for Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) — A Historical Perspective on the 16 U.S. EPA Priority Pollutant PAHs. *Polycycl. Aromat. Compd.* 35, 187–247. <https://doi.org/10.1080/10406638.2014.970291>

Zhang, H., Hu, D., Chen, J., Ye, X., Wang, S.X., Hao, J.M., Wang, L., Zhang, R., An, Z., 2011. Particle Size Distribution and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emissions from Agricultural Crop Residue Burning. *Environ. Sci. Technol.* 45, 5477–5482. <https://doi.org/10.1021/es1037904>

Γ) Ιστοσελίδες

Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, Πράξεις Υπουργικού Συμβουλίου, Έγκριση του Εθνικού Σχεδίου Διαχείρισης Αποβλήτων, (2020). URL: [ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ \(eoan.gr\)](http://www.eyan.gr/ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ_ΤΗΣ_ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ)

Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, Οδηγία (ΕΕ) 2018/851 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 30^{ης} Μαΐου 2018 για την τροποποίηση της οδηγίας 2008/98/ΕΚ για τα απόβλητα, (2018). URL: [Οδηγία \(ΕΕ\) 2018/ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 30ής Μαΐου 2018, για την τροποποίηση της οδηγίας 2008/98/ΕΚ για τα απόβλητα \(europa.eu\)](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32018L0851)

Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, Πράξεις Υπουργικού Συμβουλίου, Συμμόρφωση με τις Ευρωπαϊκές Διατάξεις της Οδηγίας 2008/50/ΕΚ, (2011). URL: [ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ \(elinyae.gr\)](http://www.eyan.gr/ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ_ΤΗΣ_ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ)